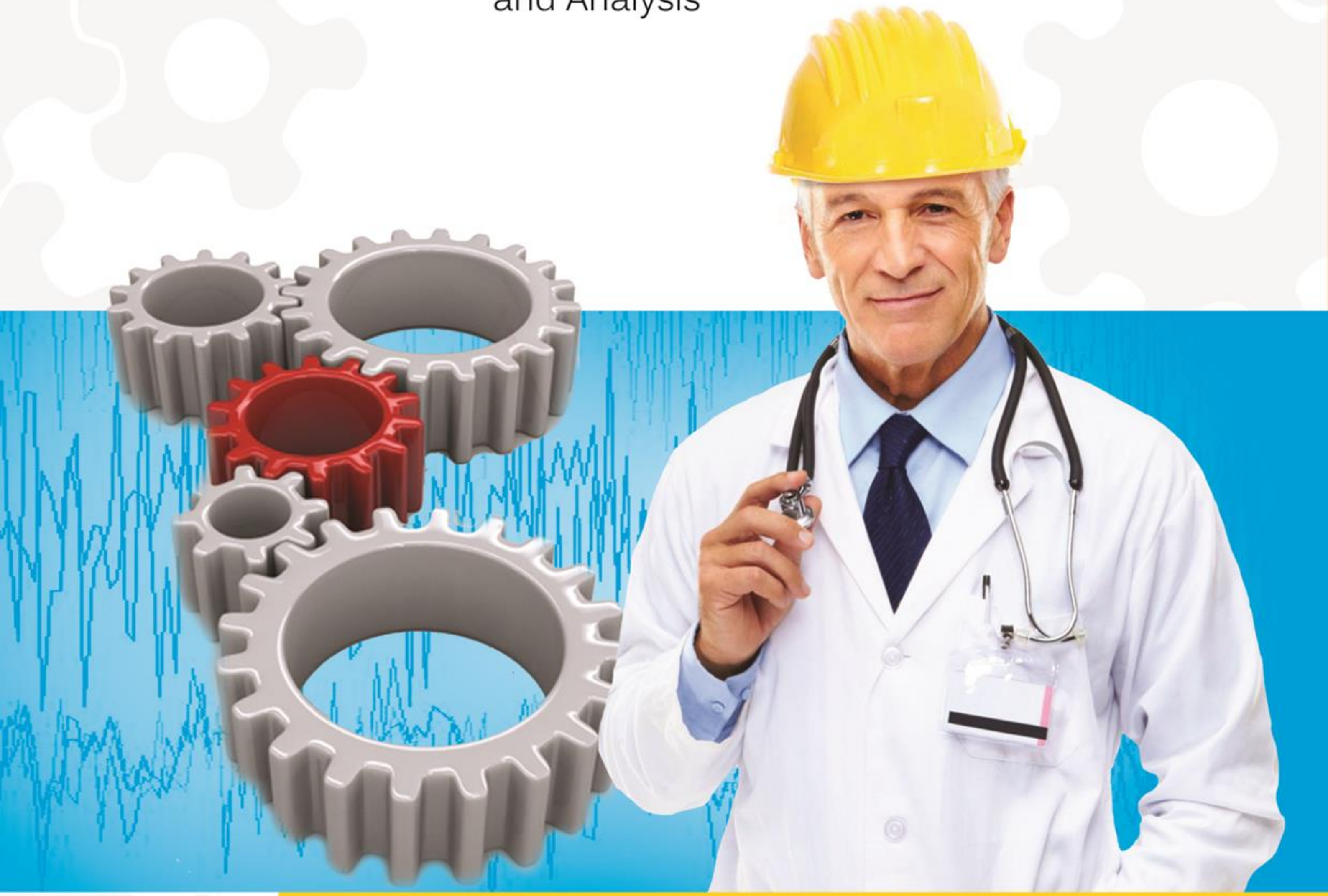
إهتــزاز الماكيــنات

أساسيات وقياسات وتحليل

Machinery Vibration

Fundamental, Measurements and Analysis



مهندس / عاطف سلام بكر زهران

إبريل ٢٠١٤

إهتزاز الماكينات

أساسيات وقياسات وتحليل

Machinery Vibration

Fundamental, Measurements and Analysis



تصميم وإخراج: أ / الحسن محمد أبو الوفا

إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى من علمني النجاح والصبر إلى من أفتقده في مواجهة الصعاب إلى روح أبي الذي لم يبخل علي يوماً بشيء وإلى أمي التي ذودتني بالحنان والمحبة.

وأقول لهم: أنتم وهبتموني الحياة والأمل والنشأة على شغف الإطلاع والمعرفة.

كما أهدى هذا الكتاب إلى كل من تأثرت بفكره وعمله وأعجبت بشخصيته خلال حياتى العملية ومنهم السيد المهندس سليمان رضا على رئيس مجلس إدارة شركة مصر للألومنيوم ووزير الصناعة الأسبق.

والسيد المهندس أحمد عبد العزيز عز فارس الصناعه ورئيس مجموعة عز الصناعية.





وإلى كل من علمني حرفاً طوال مشوار حياتى أهدي له هذا الكتاب المتواضع راجياً من المولى عز وجل أن يجد القبول والنجاح.

مهندس/عاطف سلام بكر زهران

إبريل - ٢٠١٤ م

نبذة مختصرة:-

بسم الله الرحمن الرحيم (رَبِّ اشْرَحْ لِي صَدْرِي وَيَسِّرْ لِي أَمْرِي وَاحْلُلْ عُقْدَةً مِّن لِّسَانِي يَفْقَهُوا قَوْلِي) سورة طه صدق الله العظيم.

يعتبر هذا الكتاب أول مرجع باللغة العربية يتعرض بالشرح التفصيلي لجميع وسائل فهم الإهتزازات والطرق المختلفة لقياس وتحليل وتشخيص الإهتزازات والهدف الذى أسعى إليه هو خلق جيل متخصص في هذا المجال قادر على تطوير العمل مستقبلاً ووضع حلول للمشاكل.

ولقد أُعدَّ هذا الكتاب ليتناسب مع المهندسين والفنيين بالحقل الصناعي وطلاب كليات الهندسة والمعاهد العليا الصناعية وللقارئ الراغب في الإلمام بأساسيات الإهتزازات وطرق قياس وتحليل الإهتزازات. حيث يحتوي على العديد من الأبواب والأقسام التي تناقش الموضوعات الهامة المترابطة التي تعرض بتسلسل يساعد على الفهم والتدرج في تحصيل المعلومات.

ولقد حاولت بقدر المستطاع تعريب بعض المصطلحات العلمية وأعترف أننى وجدت صعوبة كبيرة فى ذلك مع رجائى أن تلتمسوا لى العذر. وإننى أعتبر هذا الكتاب خطوة كبيرة يمكن البناء عليها فى المستقبل.

وأخيراً أرجو من كل قارئ وجد تقصيراً فى هذا المؤلف أو خطأ ما أن يرشدنا إليه حتى نستطيع تداركه فى الطبعات القادمة بإذن الله حيث أن الكمال لله وحده والذى نرجو منه العفو والعافية وأن يجعل هذا الكتاب فى ميزان حسناتنا يوم العرض عليه.

مهندس

عاطف سلام بكر زهران

مدينة السادات – إبريل ٢٠١٤ م

تفاصيل الكتاب :

الباب الأول :- الإهتزازات ومراقبة حالة الماكينات
الباب الثانى :- إستجابة النظام الميكانيكى
الباب الثالث :- أساسيات الإهتزازات
الباب الرابع :- قياس الإهتزازات
الباب الخامس :- تحليل الإهتزازات
الباب السادس :- تشخيص أعطال الماكينات
الباب السابع :- تشغيل برنامج ناجح لمراقبة حالة الماكينات الدوارة

إسم البند	ص
الباب الأول :- الإهتزازات ومراقبة حالة الماكينات	
القسم الأول :- مقدمه عن الإهتزازات	
مقدمه	٣
١- الاهتزازات في حياتنا اليومية	٤
٢- الجوانب الإيجابية والسلبية للإهتزازات	٤
٣- الإهتزازات وباراميترات التشغيل	٥
٤- الطرق الأولية فى قياس الإهتزازات	٦
٥- القوى المؤثرة فى إهتزازات الماكينات الدوارة	٧
٥-١- القوة الديناميكية	٨
٥-٢- قابلية الحركة	٨
٥-٣- الإهتزازات	٩
٦- مقاومة الجسم للإهتزازت	٩
٦-١- قوة القصور الذاتى	٩
٦-٢- قوة الصلادة	١٠
٦-٣- التخميد	١٠
٧- العلاقة بين قوى مقاومة الجسم الميكانيكية للإهتزاز	١١
٧-١- فى حالة الصلادة "Stiffness"	١١
٧-٢- فى حالة القصور الذاتى "Inertia"	١١
٨- فلسفة الإهتزازات	١٢
٩- الإهتزازات وقياس الصوت	١٣
١٠- أنواع الاهتزازات	١٣
القسم الثانى :- أنواع صيانة الماكينات	
مقدمه	١٤
١- الصيانة عند الكسر (العلاجية)	١٤
١-١- المزايا	١٥
١-٢- العيوب	١٥
٢- الصيانة الوقائية (المخططة)	١٥

إسم البند	ص
٢-١- المزايا	١٨
٢-٢- العيوب	١٨
٢-٣- أنشطة الصيانة الوقائية	١٨
٢-٣-١- استخدام الحواس "feeling"	١٩
٢-٣-٢- الفحص "Inspection"	١٩
٢-٣-٣- التثبيت "Tightening"	١٩
٢-٣-٤- النظافة "Cleaning"	١٩
٢-٣-٥- التزييت والتشحيم "Lubrication"	٢٠
٣- الصيانة التنبؤية	٢٠
٣-١- المزايا	٢٢
٣-٢- العيوب	٢٢
٣-٣- الخلاصة	٢٢
٤- الصيانة الاستباقية	٢٣
٤-١- المزايا	٢٤
٤-٢- العيوب	٢٤
القسم الثالث :- مراقبة حالة المعدات	
مقدمه	٢٥
١- المراقبة المتكاملة لحالة المعدات	٢٦
١-١- شروط تطبيق المراقبة المتكاملة	٢٧
٢- أهمية مراقبة حالة الماكينات الدوارة	٢٧
٣- تكنولوجيا مراقبة حالة المعدات	٢٨
٣-١- تحليل الاهتزازات	٢٩
٣-٢- مراحل إكتشاف وحل مشاكل المعدات (أربع مراحل)	٣١
٣-٢-١- إكتشاف المشكلة "detection"	٣١
٣-٢-٢- تحليل "analysis" المشكلة	٣٢
٣-٢-٣- تحليل السبب الجذري "root cause" للمشكلة	٣٢
٣-٢-٤- التحقق "verification" من الإصلاح	٣٢

إسم البند	ص
٣-٣- تحليل الزيوت	٣٢
٣-٣-١- تحليل الجزيئات المتآكلة	٣٣
٣-٣-٢- تأثير الزيت الملوث بالماء على عمر رولمان البللى	٣٤
٣-٣-٣- فوائد تطبيق برنامج التزييت والتشحيم	٣٥
٤- التصوير الحرارى بإستخدام الأشعة تحت الحمراء	٣٥
الباب الثانى :- النظام الميكانيكى "mechanical system"	
مقدمه	٣٩
القسم الأول :- النظام الميكانيكى "mechanical system"	
١- النظام الميكانيكى	٣٩
١-١- الكتلة	٣٩
١-٢- الياى (الزنبرك)	٤٠
١-٣- التخميد	٤١
٢- درجات الحرية	٤١
٢-١- الحركة الدورانية	٤٢
٢-٢- الحركه الإنتقاليه الخطية	٤٣
٣- دالة القوة	٤٣
٤- الأشكال الرئيسية لتخميد الإهتزازات "main forms of damping"	٤٤
٤-١- تخميد الإحتكاك "Friction damping"	٤٤
٤-٢- تخميد اللزوجة "Viscous damping"	٤٥
٤-٣- تخميد التخلف المغناطيسى "Hysteresis damping"	٤٧
٥- جميع الأنظمة تحتوى على التخميد	٤٧
٦- تأثير شدة التخميد على الرنين	٤٨
٦-١- التخامد الضئيل "Light damping"	٤٩
٦-٢- التخامد الحرج "Critical damping"	٤٩
٦-٣- التخامد التام "Over damped"	٥٠
٧- معظم الأنظمة لديها كميات صغيرة من التخميد	٥١

إسم البند	ص
القسم الثانى :- الرنين	
١- الإهتزاز الحر والقسري	٥٣
١-١- التردد الطبيعي للجسم	٥٤
١-٢- الإهتزازات القسرية فى الأنظمة الميكانيكية	٥٦
٢- منحنى الإستجابة للإهتزاز القسري	٥٨
٢-١- نطاق تضخيم التردد "amplification range"	٦٠
٢-٢- تثبيت منحنى الإستجابة للإهتزاز القسرى	٦١
٣- الرنين فى الأنظمة الديناميكية "Resonance in Dynamic Systems"	٦٤
٣-١- الرنين وإنهيار جسر مضيق تاكوما واشنطن	٦٦
٤- إختيار تردد تشغيل النظام (سرعة التشغيل) وتردد الرنين	٦٨
٤-١- المنافسة "Competition"	٦٨
٤-٢- التآكل "Wear"	٦٨
٤-٣- طلب العملاء "Customer demand"	٧٠
٥- إدارة الرنين "Managing Resonance"	٧٠
٦- حل مشاكل الرنين	٧٢
٦-١- إختبار الصدمة أو الإرتطام (الدقدقة) "Bump Test" لتحديد الترددات الطبيعية البسيطة	٧٢
٦-٢- "Operating Deflection Shape (ODS)"	٧٢
٦-٣- "Finite Element Analysis"	٧٣
٦-٤- "Run-up/run-down tests"	٧٣
الباب الثالث :- أساسيات الإهتزازات	
القسم الأول :- خواص وفهم الإهتزازات	
مقدمه	٧٧
١- ما هى الإهتزازات	٧٧
١-١- طرق قياس الإهتزازات	٧٨
١-٢- فهم الإهتزازات	٧٨
١-٣- فهم الإهتزازات من وجهة نظر الماكينة	٧٩

ص	إسم البند
٧٩	٢- خواص الإهتزازات ....
٧٩	٢-١- إستخدام حركة البندول للتعرف على الإهتزازات ....
٨١	٢-٢- الكميات الفيزيائية للحركة الإهتزازية ....
٨١	٢-٢-١- سعة الإهتزاز (x) "Amplitude" ....
٨١	٢-٢-٢- الإزاحة (d) "Displacement" ....
٨٢	٢-٢-٣- السرعة (v) "Velocity" ....
٨٢	٢-٢-٤- العجلة (a) "Acceleration" ....
٨٢	٢-٢-٥- الإهتزازه الكامله "Complete Cycles" ....
٨٣	٢-٣- الموجة الجيبية الناتجة من حركة البندول ....
٨٨	٢-٤- زاوية الطور "phase" ....
٨٨	٢-٥- التردد الدائرى (ω) ....
	القسم الثانى :- الشكل الموجى وبصمة الإهتزازات وقياس الإهتزازات
٩٠	١- الشكل الموجى "time waveform" ....
٩٠	١-١- المفاهيم والمصطلحات الخاصة بالشكل الموجى ....
٩٠	١-١-١- تعريف الفترة "period" والتردد "frequency" ....
٩١	١-١-٢- تعريف "CPM" "اللفات لكل دقيقة" ....
٩١	١-١-٣- تعريف التردد "Hz" ....
٩٢	١-١-٤- تعريف وحدة الدوران لكل دقيقة "RPM" ....
٩٢	١-٢- تأثير السرعة على الشكل الموجى ....
٩٢	١-٣- إختيار نوع السعة "amplitude" ....
٩٣	١-٣-١- تعريف القمة إلى القمة "peak-to-peak" ....
٩٣	١-٣-٢- تعريف القمة "peak" ....
٩٣	١-٣-٣- تعريف القيمة المتوسطة "average" ....
٩٤	١-٣-٤- تعريف قيمة مربع الجذر التربيع "rms" ....
٩٤	١-٣-٥- العلاقة بين كل من مربع الجزر التربيعى "rms" والقمة "peak" والقمة إلى القمة "peak-peak" ....
٩٥	١-٣-٦- أهمية إختيار نوع سعة الإهتزازات ....

إسم البند	ص
١–٤– الشكل الموجى "Waveform" يمكن أن يكون معقداً جداً	٩٥
١–٤–١– زيادة عدم الإتزان "Increase out-of-balance"	٩٦
١–٤–٢– زيادة الإحتكاك "rub"	٩٧
٢– بصمة الإهتزازات "spectrum"	٩٧
٢–١– تأثير كل من عدم الإتزان وإحتكاك الريش فى الشكل الموجى	٩٧
٢–٢– ربط شكل الإهتزازات "vibration pattern" بما يحدث بالماكينة	٩٨
٢–٣– بصمة الإهتزازات عبارة عن تردد وسعة	٩٩
٢–٤– تمثيل عدم الإتزان فى بصمة الإهتزازات	١٠٠
٢–٥– تمثيل إحتكاك الريش فى بصمة الإهتزازات	١٠١
٢–٦– وحدة جديدة من التردد: مضاعف السرعة "orders"	١٠٢
٢–٧– مراجعة البصمة	١٠٣
٣– قراءات المستوى العام للإهتزازات "Overall level readings"	١٠٥
القسم الثالث :– قياس التردد "frequency measurements"	
١– التردد "frequency"	١٠٨
١–١– طرق التعبير عن التردد	١٠٨
٢– الموجة الجيبية "Waveform"	١٠٩
٣– بصمة الاهتزاز "spectrum"	١١٠
٤– بارامترات قياس الإهتزازات "measurement parameters"	١١١
٤–١– بارامترات قياس بصمة المعدات (Fmax - Spectral lines)	١١١
٤–١–١– تأثير البارامتر "Fmax" والخاص بنطاق التردد وسرعة البيانات.	١١٢
٤–١–٢– تأثير البارامتر "Spectral lines" والخاص بدرجة تركيز ودقة بيانات البصمة	١١٣
٥– بارامترات معالجة البيانات "data processed"	١١٤
٥–١– نوع المتوسط المستخدم "Average type" (متوسط خطى أو متوسط أسى).	١١٤
٥–٢– عدد المتوسطات "Number of averages"	١١٥
٥–٣– نوع النافذة "Window type" (نافذة هانيننج أو النافذة المستطيلة)	١١٥
٦– بارامترات تحديد تفاصيل بصمة الإهتزاز "spectrum displayed"	١١٦

إسم البند	ص
٦-١- مقياس بصمة الإهتزاز "scale of the spectrum"	١١٦
٦-٢- نوع السعة "amplitude type"	١١٦
٦-٣- وحدات السعة "amplitude" والتردد "frequency" لبصمة الإهتزاز	١١٧
القسم الرابع :- تحليل بيانات الاهتزازات	
مقدمه	١١٨
١- مقارنة بيانات الإهتزازات	١٢٠
١-١- المقارنة بالبيانات المرجعية	١٢٠
١-٢- المقارنة بمحاور أخرى "other axes"	١٢٠
١-٣- المقارنة بأماكن مختلفة	١٢١
١-٤- المقارنة فى مصفوفة "stacked plots"	١٢١
١-٥- المقارنة فى شلالات "waterfall plot"	١٢٢
١-٦- مقارنة منحنى الإطراد "Trends"	١٢٢
٢- فهم الطور "phase"	١٢٣
٢-١- الخروج عن التزامن "Out of synch"	١٢٤
٢-٢- إستخدام البوصلة "compass"	١٢٥
٢-٣- أهمية الزمن فى الطور "phase"	١٢٧
٢-٤- الطور "phase" هو أداة تشخيصية مهمة "diagnostic tool"	١٢٧
الباب الرابع :- قياس الإهتزازات	
مقدمه فى قياس الاهتزازات :-	١٣١
القسم الأول :- قياس سعة الإهتزازات	
مقدمه :- الوصف اللفظى والعددى لإهتزازات الماكينة	١٣٣
١- قياس سعة الإهتزازات "measuring amplitude"	١٣٤
١-١- قياس السعة بإختيار القمة "peak"	١٣٥
١-٢- قياس السعة بإختيار القمة إلى القمة "pk-pk"	١٣٥
١-٣- قياس السعة بإختيار مربع الجذر التربيعى "RMS"	١٣٥
١-٤- قياس السعة بإختيار المتوسط (Avg)	١٣٦
٢- طرق قياس السعة فى الصناعة	١٣٦

إسم البند	ص
٢-١- سعة الإزاحة "Displacement amplitude"	١٣٧
٢-٢- سعة السرعة "Velocity amplitude"	١٣٧
٢-٣- سعة العجلة "Acceleration amplitude"	١٣٧
٢-٤- أهمية إستخدام سعة السرعة "velocity amplitude" للماكينة	١٣٧
٣- العلاقة بين السعات المختلفة (الإزاحة، السرعة والعجلة) "amplitude relationship"	١٣٩
٣-١- عند تثبيت السرعة "Velocity"	١٣٩
٣-٢- عند تثبيت الإزاحة "Displacement"	١٤٠
٣-٣- عند تثبيت العجلة "Acceleration"	١٤٠
٣-٤- تأثير عملية التكامل على سعة الإهتزازات	١٤١
٤- التشوية التوافقى و قياسات السعة	١٤٢
٤-١- تأثير التشوية التوافقى على قياس السعة	١٤٤
٥- معامل كريست "Crest factor" وشكل الموجة	١٤٥
القسم الثانى :- الضمانات اللازمة لصحة قياس الإهتزازات	
مقدمه :-	١٤٧
١- التعرف "recognize" على الماكينات التى يجب مراقبتها	١٤٧
٢- إختيار نوع اللاقط وكيفية عمله "Transducer type"	١٤٨
٣- وضع بارامترات قياس الإهتزازات "measurement setup"	١٤٩
٣-١- جمع بيانات الشكل الموجى وسعة التخزين	١٥٢
٤- تثبيت لاقط الإهتزازات على المعدات "accelerometer mounted"	١٥٣
٤-١- تثبيت اللاقط بحيث يكون أقرب ما يمكن من رولمان البلى	١٥٤
٤-٢- تأكد بأن اللاقط مثبت أو مربوط بحزم	١٥٥
٤-٣- التأكد من وضع اللاقط فى الإتجاه الصحيح	١٥٧
٤-٤- ثبت نفس اللاقط المستخدم فى نفس المكان	١٥٨
٤-٥- ثبت اللاقط على شئ متين	١٥٨
٤-٦- يجب الإعتناء بلاقط قياس الإهتزازات	١٥٩
٤-٧- الإعتناء بالأمان الشخصي	١٦٠
٤-٧-١- الإصابة "injury" من الأجزاء المتحركة للماكينات	١٦٠

إسم البند	ص
٤-٧-٢- الصدمات الكهربية "electrical shock"	١٦٠
٤-٧-٣- الأضرار الناتجة من تأثير المثبت المغناطيسى للاقط الإهتزازات.	١٦١
القسم الثالث :- جمع بيانات الإهتزازات	
١- إستخدام جهاز جامع الإهتزازات لقياس الإهتزازات على المعدات	١٦٢
٢- كثرة نقاط القياس خلال جولة القياسات	١٦٢
٣- التعريف الدقيق لقائمة القياسات "recording list"	١٦٣
٤- وضع الخطة الشهرية والجدول الزمنى لقياس الإهتزازات	١٦٥
٥- الطريقة الصحيحة لقياس الإهتزازات	١٦٦
٦- تحميل وتفريغ البيانات على الكمبيوتر "dump data & Load root"	١٦٦
٧- التحقق من صحة البيانات الملتقطة "validate the data"	١٦٧
٧-١- مشاكل لاقط القياس "Transducer faults"	١٦٧
٧-١-١- ظهور الشكل التقليدى لمسار التزلج "ski-slope" والذى يظهر فى البصمة	١٦٧
٧-١-٢- إصطدام اللاقط أثناء القياس	١٦٨
٧-١-٣- التغير المفاجئ فى درجة حرارة اللاقط	١٦٨
٧-١-٤- عدم إستقرار اللاقط فى بداية التشغيل	١٦٩
٧-١-٥- وجود أحداث لحظية عابرة "transient event"	١٦٩
٧-٢- تصحيح حالات القياس "Correct test conditions"	١٧١
٧-٢-١- تصحيح نقطة القياس "Correct test point"	١٧١
٧-٢-٢- تحديد سرعة الدوران (قمة "peak")	١٧١
٨- قياس الإهتزازات بتكنولوجيا (PeakVue)	١٧٤
٨-١- مقارنة بصمة الإهتزازات بإستخدام PeakVue وبالقياسات العادية	١٧٥
٨-٢- فوائد إستخدام "PeakVue" فى قياسات الإهتزازات	١٧٦
القسم الرابع :- المخطط العام لقياس الإهتزازات	
١- عرض المستوى العام للإهتزاز "Overall vibration display"	١٧٧
١-١- فى حالة إختيار العجلة	١٧٧
١-٢- فى حالة إختيار السرعة	١٧٨

إسم البند	ص
١-٣- فى حالة إختيار الإزاحة	١٧٨
١-٤- جدول وحدات السعة "Amplitude units"	١٧٨
٢- حساب ترددات بصمة المعدات "Calculation of Frequency Spectra"	١٧٩
٣- الرسم البيانى للمخطط العام لقياس الإهتزازات	١٧٩
٤- أنواع أجهزة الإستشعار "Transducer types"	١٨١
٤-١- أجهزة إستشعار الإزاحة "Displacement transducers"	١٨١
٤-٢- جهاز إستشعار السرعة "Velocity transducers"	١٨٥
٤-٣- أجهزة إستشعار العجلة (لاقط قياس الإهتزازات) "Accelerometers"	١٨٦
الباب الخامس :- تحليل الإهتزازات	
القسم الأول :- العلاقة بين الموجة الجيبية والطيف الترددي	
مقدمه :-	١٩١
١- عملية التحويل من الزمن الى التردد بإستخدام تحويل فورييه السريع	١٩١
٢- الإشارات "Signals"	١٩٣
٢-١- الموجة الجيبية "Sine wave"	١٩٣
٢-٢- الصدمات "impacts"	١٩٤
٢-٣- الموجة المربعة والتوافقات "Square wave and harmonics"	١٩٥
٢-٤- الموجة المقصوصة "Clipped wave"	١٩٦
٢-٥- الأحداث اللحظية العابرة "Transients"	١٩٧
٢-٦- التشكيل والترددات الجانبية "Modulation and sidebands"	١٩٧
٢-٧- تردد الخفقان "Beat frequencies"	٢٠١
٢-٨- الإشارات المتزامنة والمتوافقة	٢٠٣
القسم الثانى :- الترددات القسرية "Forcing frequencies"	
مقدمه :-	٢٠٤
١- الترددات القسرية "Forcing frequencies"	٢٠٤
١-١- حساب الترددات القسرية "Calculating forcing frequencies"	٢٠٤
١-١-١- مراجعة على الترددات القسرية	٢٠٧
١-٢- حساب الترددات القسرية لرولمان البللى "Forcing frequency"	٢٠٨

ص	إسم البند
٢١١	١-٢-١- ملاحظات على حساب الترددات القسرية ....
٢١٤	١-٣- الترددات القسرية لعناصر نقل الحركة "Transmission components" ..
٢١٤	١-٣-١- الترددات القسرية لصندوق التروس ....
٢١٩	١-٣-٢- صندوق تروس متعدد المراحل "multi-stage gearboxes" ...
٢٢١	١-٣-٣- سيور نقل الحركة "Belt drives" ....
٢٢١	١-٣-٤- ماكينة معقدة "complex machine" ....
	القسم الثالث :- مراحل تحليل بيانات الإهتزازات
٢٢٤	مقدمه :- ....
٢٢٥	١- المرحلة الأولى:- مرحلة إكتشاف المشكلة "detection phase" ....
٢٢٦	٢- الأساليب الأتوماتيكية للفحص والغربلة "screening" ....
٢٢٦	٢-١- التقارير الإستثنائية "exception reports" ....
٢٢٦	٢-٢- وضع حدود الإنذار "Setting alarm limits" ....
٢٢٧	٢-٣- حدود الإنذار الثابتة "fixed alarm limits" ....
٢٢٨	٢-٣-١- معايير شدة الإهتزازات رقم (١٠٨١٦/٢٣٧٢) ....
٢٢٩	٢-٤- حدود الإنذار المحسوبة "calculated alarm limits" ....
٢٣٠	٢-٥- حدود الإنذار الإحصائية "Statistics" ....
٢٣٣	٢-٥-١- معادلة حساب الإنحراف المعيارى "standard deviation" .....
٢٣٤	٢-٦- تطوير الاحصائيات "Statistics with a twist" ....
٢٣٥	٢-٧- أساليب كشف المشاكل بإستخدام حزم البرامج ....
٢٣٥	٢-٧-١- نطاق الإنذار "Band alarms" ....
٢٣٦	٢-٧-٢- الإنذار المغلف "envelope/mask alarms" ....
٢٣٧	٢-٧-٣- النظم الخبيرة "Expert systems" ونظم الذكاء الاصطناعي ....
٢٣٨	٢-٧-٤- تأثير تغير السرعة "speed variation" على حدود الإنذار ......
٢٣٩	٣- ملخص مرحلة الكشف "detection phase" ....
	القسم الرابع :- مرحلة تحليل/تشخيص المشكلة "analysis/diagnosis"
٢٤١	مقدمه :- ....
٢٤١	١- المرحلة الثانية :- تحليل/تشخيص المشكلة "analysis/diagnosis" ....

إسم البند	ص
١-١- التحقق من صحة البيانات الملتقطة "validate the data"	٢٤٢
١-٢- تحليل التوافقات "Analyzing Harmonics"	٢٤٢
١-٣- تحليل الترددات الجانبية "Analyzing Sidebands"	٢٤٤
١-٤- ضوضاء الأرضية و"المطبات" "Noise floor and humps"	٢٥٠
١-٥- أهمية سعة الإهتزازات "importance of vibration amplitude"	٢٥٣
١-٦- مقارنة بصمات الإهتزازات "Spectral comparison overview"	٢٥٤
١-٦-١- المقارنة بالبيانات المرجعية	٢٥٦
١-٦-٢- المقارنة فى مصفوفة "stacked plots"	٢٥٧
١-٦-٣- المقارنة فى شلالات "waterfall plot"	٢٥٨
١-٦-٤- ملخص لعملية المقارنة	٢٦٠
١-٧- العرض اللوغاريتمى "Logarithmic displays"	٢٦٠
١-٨- فهم إهتزازات الماكينة	٢٦٢
١-٨-١- المقارنة بمحاور أخرى "other axes"	٢٦٢
١-٨-٢- مقارنة الثلاث محاور "triaxial plot"	٢٦٣
١-٨-٣- المقارنة بأماكن مختلفة "another location"	٢٦٤
١-٨-٤- المقارنة بماكينة أخرى مشابه	٢٦٤
١-٩- تحليل بيانات الشكل الموجى "analyze time waveform data"	٢٦٦
١-٩-١- وجود ظواهر "phenomenon" فى الشكل الموجى غير موجودة فى بصمة الإهتزازات	٢٦٨
١-٩-٢- يوجد العديد من الحالات "conditions" التى يتم التأكد منها بشكل جيد بالنظر فى الشكل الموجى	٢٦٨
١-٩-٣- إستخدام الشكل الموجى لحساب الزمن والتردد للمساعدة على فهم ما يجرى داخل الماكينة	٢٧١
القسم الخامس :- مرحلة تحليل السبب الجذري للمشكلة	
١- المرحلة الثالثة :- تحليل السبب الجذري للمشكلة " The root cause analysis phase"	٢٧٤
١-١- التحقق من السجل التاريخي للبيانات "history of data"	٢٧٥

ص	إسم البند
٢٧٧	١-٢- النظره الشاملة لإهتزازات الماكينة "Look at the big picture" ....
٢٧٨	٢- المرحلة الرابعة :- التحقق من الإصلاح "verification" ....
	الباب السادس :- تشخيص أعطال الماكينات
٢٨٣	مقدمه:- ....
٢٨٣	١- الطرق الثلاثة لتسهيل أسلوب عملية التشخيص ....
٢٨٣	١-١- دراسة أو فهم بصمة الإهتزازات "Understand the spectrum" ....
٢٨٤	١-١-١- الترددات الفرعية من سرعة الدوران "Sub-synchronous" ....
٢٨٤	١-١-٢- الترددات (القمم) المتزامنة مع سرعة الدوران " Synchronous components" ....
٢٨٤	١-١-٣- الترددات (القمم) غير المتزامنة مع سرعة الدوران "Non-synchronous" ....
٢٨٤	١-٢- فهم الماكينة "Understand the machine" ....
٢٨٥	١-٣- التركيز على المشاكل الكبيرة الشائعة ....
	القسم الأول :- تشخيص الأعطال الشائعة (الأربعة الكبار)
٢٨٧	مقدمه :- ....
٢٨٧	١- الإتزان "Unbalance" ....
٢٨٩	١-١- قوة الطرد المركزي "centrifugal force" ....
٢٩٠	١-٢- أسباب عدم إتزان العضو الدوار "Causes of Rotor Unbalance" ....
٢٩١	١-٣- أنواع عدم الإتزان "Types of Unbalance" ....
٢٩١	١-٣-١- عدم الإتزان الإستاتيكى "Static Unbalance" ....
٢٩٢	١-٣-٢- عدم الإتزان الزوجى "Couple Unbalance" ....
٢٩٣	١-٣-٣- عدم الإتزان (العام) الديناميكى " Dynamic (General) Unbalance" ....
٢٩٤	١-٤- معايير الإتزان "Balancing Standards" ....
٢٩٥	١-٥- تشخيص وتحليل عدم الإتزان "Diagnosing Unbalance" ....
٢٩٦	١-٥-١- تحليل الاهتزاز للماكينات العمودية "Vertical" والماكينات المتدلية "overhung" ....

ص	إسم البند
٢٩٩	١-٥-٢- تشخيص وتحليل الإهتزازات للأنواع الثلاثة لعدم الإتزان ....
٣٠٠	١-٥-٣- تحليل وتشخيص عدم الإتزان بإستخدام زاوية الطور "Phase" ...
٣٠١	١-٥-٤- ملخص على تحليل البيانات "Analyzing the data" ....
٣٠٥	١-٦- عمل الإتزان للعضو الدوار الصلب فى الموقع "field balancing" ....
٣٠٥	١-٦-١- الإحتياطات اللازمة لعمل الإتزان ....
٣٠٦	١-٦-٢- قواعد الإتزان "Balancing Rules" ....
٣٠٦	١-٦-٣- إختيار الوزن التجريبى المناسب "Trial Weight" ....
٣٠٦	١-٦-٤- خطوات تنفيذ عملية الإتزان فى مستوى واحد " Single-Plane Procedure" ....
٣٠٧	١-٦-٥- خطوات تنفيذ عملية الإتزان فى مستويين " Two-Plane Procedure" ....
٣٠٨	١-٦-٦- أسباب حدوث خطأ فى عملية الإتزان "Balance Job" ....
٣٠٩	١-٦-٧- المشاكل التى تؤدى إلى عدم إستمرار الروتور فى إتزانه ....
٣٠٩	٢- عدم السنترة أو المحاذاه "Misalignment" ....
٣١٠	٢-١- أسباب عدم السنترة "Causes of misalignment" ....
٣١٠	٢-٢- الآثار السلبية لعدم السنترة "Effects" ....
٣١١	٢-٣- أنواع عدم السنترة "misalignment" ....
٣١١	٢-٣-١- عدم السنترة المتوازى "parallel misalignment" ....
٣١٢	٢-٣-٢- عدم السنترة الزاوى "angular misalignment" ....
٣١٤	٢-٣-٣- عدم السنترة الشائع "Common Misalignment" ....
٣١٥	٢-٤- تفسير ما يحدث لكوبلنج المعدة عند عدم السنترة المتوازى والزاوى ....
٣١٥	٢-٤-١- فى حالة عدم السنترة الزاوى ....
٣١٦	٢-٤-٢- عندما يكون عدم السنترة المتوازى فى الإتجاه الأفقى ....
٣١٨	٢-٤-٣- عندما يكون عدم السنترة المتوازى فى الإتجاه الرأسى ....
٣١٨	٢-٥- تحليل بصمة الإهتزازات "FFT spectrum" ....
٣١٩	٢-٥-١- عدم السنترة الزاوى "angular misalignment" ....
٣١٩	٢-٥-٢- عدم السنترة المتوازى "parallel misalignment" ....

إسم البند	ص
٢-٦- أسباب زيادة الإهتزازات فى الإتجاه المحورى "Axial vibration"	٣٢٠
٢-٧- تحليل قياسات زاوية الطور "phase analysis"	٣٢١
٢-٨- ملخص عن عدم السنترة	٣٢٢
٢-٩- الأساليب المستخدمة لعمل محاذاة للأعمدة	٣٢٦
٢-١٠- عدم سنترة رولمان البلى "Misaligned bearing"	٣٢٧
٣- التفكك الميكانيكى "Mechanical looseness"	٣٢٧
٣-١- تشخيص التفكك الناتج من الحركة الدورانية والغير الدورانية " rotating and non-rotating looseness"	٣٢٨
٣-١-١- النوع الأول وهو التفكك الناتج من الحركة الدورانية " rotating looseness"	٣٢٨
٣-١-٢- النوع الثانى وهو التفكك الناتج من الحركة غير الدورانية "non-rotating looseness"	٣٣٣
٣-٢- ملخص	٣٣٨
٤- رولمان البلى "Rolling element bearings"	٣٣٩
٤-١- كيفية البحث فى بصمة الإهتزازات لإكتشاف مشاكل رولمان البلى	٣٣٩
٤-٢- المشاكل الأكثر شيوعاً لرولمان البلى	٤٤٠
٤-٣- مكونات رولمان البلى	٤٤٠
٤-٤- الترددات القسرية لرولمان البلى "Forcing frequency"	٤٤١
٤-٥- المراحل التسعة لتدهور أو إنهيار رولمان البلى " nine stages of bearing failures"	٤٤٢
٤-٥-١- تقسيم بصمة الإهتزازات إلى أربعة مناطق	٤٤٢
٤-٥-٢- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة الأولى	٤٤٣
٤-٥-٣- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة الثانية	٤٤٣
٤-٥-٤- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة الثالثة	٣٤٤
٤-٥-٥- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة الرابعة	٣٤٤
٤-٥-٦- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة الخامسة	٣٤٨
٤-٥-٧- إنهيار رولمان البلى:- المرحلة السادسة	٣٥٠

إسم البند	ص
٤-٥-٨- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة السابعة	٣٥٠
٤-٥-٩- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة الثامنة	٣٥١
٤-٥-١٠- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة التاسعة	٣٥١
٤-٦- أمثلة	٣٥٢
القسم الثانى :- تشخيص المشاكل الأخرى للماكينات الدوارة	
١- إنحناء الأعمدة "bent shaft"	٣٥٦
١-١- تشخيص إنحناء العمود	٣٥٦
١-٢- علاقات الطور فى حالة إنحناء الأعمود	٣٥٨
٢- تحليل إهتزازات صندوق التروس "Gearbox analysis"	٣٥٨
٢-١- البصمة "Spectrum" والشكل الموجى "Time waveform" للتروس	٣٥٨
٢-٢- مشاكل صندوق التروس "Gearbox problems"	٣٦٠
٢-٢-١- الكشف عن تآكل الأسنان "Detecting tooth wear"	٣٦٠
٢-٢-٢- الحمل على الأسنان "Tooth load"	٣٦٢
٢-٢-٣- زيادة خلوصات تعشيق التروس "Gear backlash Excessive".	٣٦٣
٢-٢-٤- عدم مركزية التروس أو التروس على الأعمدة المنحنية " eccentric gears and gears with bent shafts"	٣٦٤
٢-٢-٥- عدم سنترة التروس "Misaligned gears"	٣٦٥
٢-٢-٦- شرخ أو كسر الأسنان "Cracked or broken tooth"	٣٦٧
٢-٣- تردد الأسنان المتزاوجة "Hunting tooth frequency"	٣٦٨
٢-٣-١- معادلة تردد الأسنان المتزاوجة "hunting tooth frequency" .	٣٧٠
٣- تشخيص مشاكل الكوبلنج "Diagnosing coupling faults"	٣٧١
٤- مشاكل سيور نقل الحركة "Belt-drive problems"	٣٧٢
٤-١- تحديد سرعة سير نقل الحركة "Determining the Belt Speed"	٣٧٣
٤-٢- حساب تردد السير "Belt freq".	٣٧٤
٤-٣- تهالك السيور "Worn belts"	٣٧٤
٤-٤- عدم مركزية الطنابير "Eccentric sheaves" وإنحناء الأعمدة "Bent Shaft"	٣٧٦

ص	إسم البند
٣٧٨	٤-٥- عدم سنترة البكرة "Pulley Misalignment" ....
٣٧٨	٤-٦- رنين السيور "Belt Resonance" ....
٣٧٩	٥- الأرجل المعلقة "Soft Foot" ....
٣٨٠	٥-١- أسباب حالات القدم المعلقة ....
٣٨١	٥-٢- تأثير مشكلة القدم المعلقة "Soft foot" ....
٣٨١	٦- الكوكيد لرولمان البلي "Cocked bearing" ....
٣٨١	٦-١- سوء تركيب رولمان البلي "Poor installation" ....
٣٨٢	٦-٢- علامات وأعراض "Cocked Bearing" ....
٣٨٢	٦-٣- علاقات الطور فى حالة الكوكيد لرولمان البلي ....
٣٨٣	٧- مشكلة عدم كفاية التشحيم فى رولمان البلي "Inadequate Lubrication" ....
٣٨٤	٨- مشاكل تسرب التيار الكهربى "Current leakage problems" ....
٣٨٥	٨-١- أضرار تسرب التيار الكهربى ....
٣٨٦	٨-٢- كيفية الحد من مشكلة تسرب التيار الكهربى ....
٣٨٦	٩- مشكلة إنزلاق العناصر المتحركة لرولمان البلي "Skidding – sliding" ....
٣٨٧	٩-١- الإنزلاق والخلوص الزائد (قلة الشحط) "Sliding and loose fit" ....
٣٨٧	٩-٢- معاينة رولمان البلي "Observe the bearing" ....
٣٨٨	٩-٣- إستخدام الإستروبسكوب "stroboscope" ....
٣٨٨	٩-٤- الإستنتاج "Conclusion" ....
٣٨٨	١٠- عدم مركزية الدوران "Eccentric rotor" ....
٣٨٩	١١- تردد الرنين "Resonance frequency" ....
٣٩٠	١١-١- تشخيص حالات الرنين ....
٣٩٢	١١-٢- الإختبارات اللازمة لمعرفة تردد الرنين ....
٣٩٢	١١-٢-١- إختبار الصدمة "Bump tests" ....
٣٩٢	١١-٢-٢- تشغيل الماكينة أو إيقافها "Run Up or Coast Down" ....
٣٩٣	١١-٢-٣- إختبار تغيير السرعة "Variable speed test" ....
٣٩٤	١٢- إحتكاك الروتور "Rotor rubs" ....

القسم الثالث :- القوى الهيدروليكية والهوائية "Hydrolic and aerodynamic forces"	
إسم البند	ص
١- ريش المراوح أو الطلمبات أو الضواغط "Blade pass" أو "vane pass"	٣٩٦
١-١- مشاكل الريش "Blade faults"	٣٩٦
١-٢- إضطراب السريان "Flow turbulence"	٣٩٦
١-٣- التكهف "Cavitation"	٣٩٧
١-٣-١- خطوات تكون ظاهرة التكهف	٣٩٧
١-٣-٢- العوامل التى تسبب التكهف	٣٩٧
١-٣-٣- الأماكن التى يمكن أن يحدث بها التكهف	٣٩٨
١-٣-٤- علاج التكهف	٣٩٨
٢- الطلمبات "Pumps":- تشخيص المشاكل المرتبطة بالطلمبات " Diagnosing problems"	٣٩٩
٣- المراوح "Fans":- تشخيص المشاكل المرتبطة بالمراوح "Diagnosing problems"	٤٠١
٤- الضواغط "Compressors"	٤٠٣
٤-١- التآكل فى ضواغط الطرد المركزى "Centrifugal compressor wear" .	٤٠٣
٤-٢- مشكلة ضغط السريان فى ضاغط الطرد المركزى " Centrifugal compressor surge"	٤٠٣
٥- الماكينات الترددية "Reciprocating machines"	٤٠٤
٥-١- المحركات الترددية "Reciprocating engine"	٤٠٤
القسم الرابع :- توربينات الغاز والبخار "Steam and Gas Turbines"	
١- تشخيص توربينات الغاز والبخار "Diagnosing Steam and Gas Turbines" ..	٤٠٦
٢- مشاكل سبائك كراسى التحميل "Journal bearing Problems"	٤٠٧
٢-١- مشاكل التآكل/الخلوصات "Wear/Clearance" فى سبائك كراسى التحميل .	٤٠٨
٢-٢- عدم إستقرار دوامة الزيت "Oil Whirl"	٤٠٩
٢-٣- خفقان الزيت "Oil Whip"	٤١٠
٢-٤- رسم بيانى للأوربت "Orbit plots"	٤١٢

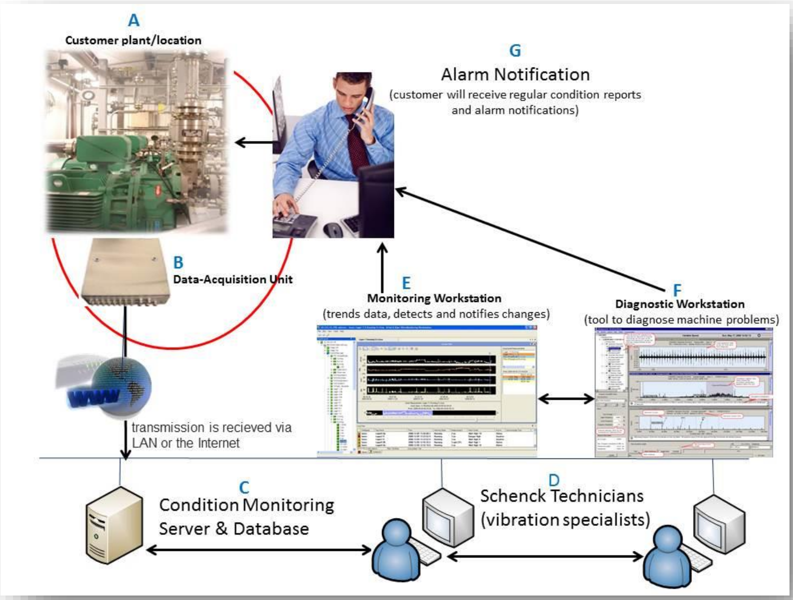
إسم البند	ص
القسم الخامس :- المحركات الكهربائية "Electric motors"	
١- تشخيص الاعطال المرتبطة بالمحركات الكهربائية " Diagnosing faults "associated with electric motors	٤١٥
٢- مشاكل العضو الثابت "Stator problems"	٤١٧
٣- السوفت فووت "Soft foot"	٤١٧
٤- عدم مركزية العضو المتحرك "Rotor eccentricity"	٤١٧
٥- مشاكل العضو الدوار "Rotor problems"	٤١٨
٦- إنحناء العضو الدوار بالحرارة "Rotor bow Thermal"	٤١٨
٧- شرخ بارات الروتور "Cracked rotor bars"	٤١٩
٨- تفكك بارات الروتور "Loose rotor bars"	٤١٩
٩- تفكك الروتور على العمود "Loose rotor on the shaft"	٤٢٠
١٠- تفكك الملفات الكهربائية للإستاتور "Loose stator windings"	٤٢٠
١١- مشاكل الرقائق الحديدية "Lamination problems"	٤٢١
١٢- تفكك مسامير التربيط للطور "Phasing Loose connections"	٤٢١
١٣- المشاكل الأخرى للمحركات الكهربائية	٤٢٢
١٣-١- أسباب حرق المواتير	٤٢٢
١٣-٢- أهم الأعطال في محركات التيار المستمر	٤٢٢
١٣-٣- أسباب زيادة الأمبير في حالة عدم الحمل "no load"	٤٢٣
١٣-٤- أسباب إرتفاع صوت المحرك الكهربى	٤٢٣
الباب السابع :- تشغيل برنامج ناجح لمراقبة حالة الماكينات الدوارة	
مقدمه:-	٤٢٦
١- إجراء دراسة شاملة للمصنع "plant survey"	٤٢٦
١-١- المسائل المالية "Financial issues"	٤٢٦
١-٢- المسائل المادية "Physical issues"	٤٢٧
٢- إختيار الماكينات المراد إختبارها	٤٢٧
٣- تقسيم الماكينات من حيث الأهمية	٤٢٧
٤- تجميع البيانات الفنية للمعدات (تعرف على ماكينتك)	٤٢٨

إسم البند	ص
٥- إختيار مواضع نقط القياس على المعدات وطريقة التثبيت	٤٢٩
٦- أنواع وخصائص القياسات على المعدات	٤٣٠
٧- إعداد قاعدة البيانات "Setting up the database"	٤٣٥
٧-١- أمثلة لرسومات الماكينات موضحاً بها تسلسل أجزائها ونقط القياس عليها ...	٤٣٦
٧-٢- تحديد الحدود المسموحه لإهتزاز المعدات	٤٣٩
٨- قياس الإهتزازات على المعدات بالموقع تبعاً لخطة القياس	٤٤٠
٩- مرحلة إكتشاف المشكلة "detection phase" إنظر إلى القسم الثالث من الباب الخامس	٤٤٠
١٠- مرحلة تحليل المشكلة "analysis phase" إنظر إلى القسم الرابع من الباب الخامس	٤٤٠
١١- عمل التوصيات "recommendation"	٤٤٠
١٢- تحليل السبب الجذري للمشكلة أنظر إلى القسم الخامس من الباب الخامس	٤٤٢
١٣- التحقق من الإصلاح إنظر إلى القسم الخامس من الباب الخامس	٤٤٢
١٤- عوامل إخرى تؤدى إلى نجاح برنامج مراقبة حالة الماكينات الدوارة	٤٤٢
١٤-١- واجبات قسم مراقبة حالة المعدات	٤٤٢
١٤-٢- واجبات إدارة الصيانة	٤٤٣
١٤-٣- واجبات مدير المصنع	٤٤٤

الباب الأول

الإهتزازات ومراقبة حالة الماكينات

Vibration and Condition Monitoring



أقسام الباب الأول

١- القسم الأول : مقدمه عن الإهتزازات

٢- القسم الثانى : أنواع صيانة الماكينات

٣- القسم الثالث : مراقبة حالة المعدات

القسم الأول :- مقدمه عن الإهتزازات "Introduction to vibration"

مقدمه:-

الإهتزازات مثل الموجات تبدأ بمكان ما ويسمى منبع الإهتزازات "Source of vibration" وعندما يهتز هذا المنبع بكيفية معينة تهتز جزيئات الوسط المحيط بنفس الكيفية إذ ينتقل الإهتزاز أولاً من المصدر إلى جزيئات الوسط المجاور له أو المتصله به ومنها إلى جزيئات الوسط الذى تليها وهكذا ينتشر هذا الإهتزاز أو هذا الإضطراب فى الوسط على هيئة حركة موجية فالموجة ما هى إلا إضطراب ينتقل وأثناء إنتقالها من الممكن أن تكبر وهذا فى حد ذاته تعتبر (نعمه ونقمه).

وتكون (نعمه) لأنها لها خاصية الإنتقال من مكان إلى آخر وبالتالى عندما يكون هناك عيب فى جزء من الصعب القياس عنده أو الوصول إليه فإنه من الممكن قياس الإهتزازات فى مكان آخر بعيد وبالتالى يمكن تحليل وتشخيص المشكلة.

وتكون(نقمة)لأنهاعندما تنتقل من مكان إلى آخر أوتسير فى مسار ما فإنها من الممكن أن تكبر وتكسر كل شيء فى طريقها.

والإهتزازات شأنها شأن مثيلاتها من الظواهر المختلفة فإذا وصلت إلى الحالة الحرجة فإنها تترك أثارها التدميرية على أجزاء الماكينة.

ومن الناحية العملية لا توجد أجزاء ماكينات تامة الكمال فلا يوجد كرسى محور ولا عمود ولا ترس ولا ريشة توربينية تامة الكمال فالكمال لله وحده. ونتيجة طبيعية لذلك فان الماكينات التي تحتوى على هذه الأجزاء إذا دارت تهتز حتى ولوكانت جديدة نتيجة العديد من المؤثرات الذاتية أوالخارجية كعدم الإتزان أوعيوب في كراسى التحميل أوالتفكك الميكانيكى الناتج من عدم التثبيت الجيد أو عدم سنترة محاور المعدات أو تأثير المعدات والماكينات المجاورة أو حتى من اختلاف المعدن في الجزء الواحد.

وباستعمال الماكينات فان أجزاءها تبلى أو تتآكل أو تنحرف قليلا عن وضعها الأصلى فيحدث نتيجة لذلك خلوصات غير مرغوب فيها تزداد بطريقة تراكمية إلى أن ينتهى ذلك بكسر الماكينة.

وهذا التطور في زيادة اهتزاز الماكينات الدائرة يمكن ملاحظته بالقياس المنتظم لمستوى الاهتزازات وعلية يمكن التنبؤ بحالة الماكينة وتحديد مشاكلها وإصلاحها قبل أن تتكسر بمدة كافية وبهذه الطريقة يمكن الاحتفاظ بالماكينات الدوارة في الخدمة لمدة أطول دون الحاجة إلى تعطيل الإنتاج بين الحين والآخر لفك الماكينة وتغيير أجزاء منها دون داع لذلك.

إهتزاز الماكينات (أساسيات - قياسات - تحليل)

١- الاهتزازات في حياتنا اليومية

ونحن غالبا ما نرى أمثلة من الاهتزازات في حياتنا اليومية مثل حركة البندول (وهى تذبذبات دورية حول نقطة السكون) وتذبذب خيوط الجيتار (عند شد الخيط) أو إهتزازات عشوائية مثل إهتزاز إطارات السيارات في طريق وعر أو إهتزازات هائلة مثل الزلازل "earthquakes" (ناتجة من النشاط الجيولوجى).

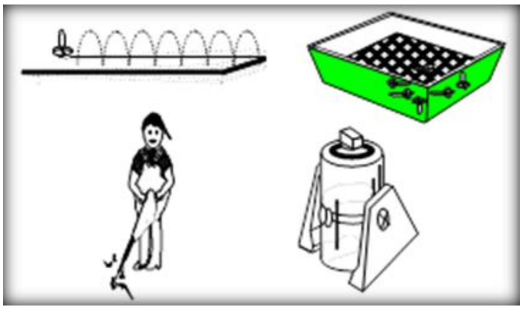


الإهتزازت ظاهرة "phenomenon" طبيعية نقابلها فى حياتنا اليومية فهى موجودة فى كل شىء فى حياتنا (الماكينات– الطائرات – العربات – السكه الحديد – طبلة الأذن – الأشجار– الكبارى حتى الكلام به إهتزاز) أى أن كل شىء فى حياتنا مبنى على الإهتزازات وعادة ما تكون الإهتزازات مفيدة جداً لمن يدرى كيفية التعامل معها وضارة جداً بالجاهل بها.

٢- الجوانب الإيجابية والسلبية للإهتزازات

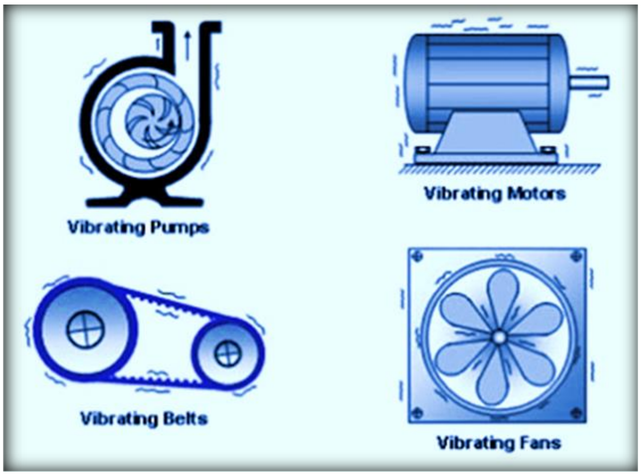
الجوانب الإيجابية للإهتزازات

ليس كلّ أنواع إهتزاز الماكينات غير مرغوب فية ويمكن فى أغلب الآحيان قد صمم عمدا وبغرض وظيفى معين لإستخدامة فى الصناعة. حيث توجد إهتزازات مفيدة في الحياة ومرغوب فيها مثل قيام الأم أو الأب بهز السرير لطفليهما الصغير حتى ينام والهزاز الذى يهز أرجل اللاعبين أوغيرهم ليزيل التعب فى العضلات وتستخدم الإهتزازات أيضا فى نقل المسامير من لوح إلى آخر وفى فصل الشوائب (فى الغرابيل) وفى تكسير الأرض أو الخرسانه (حجارى) ويستخدم الهزاز فى التصميم لعمل إختبار لأى جسم لمعرفة تركيبه.

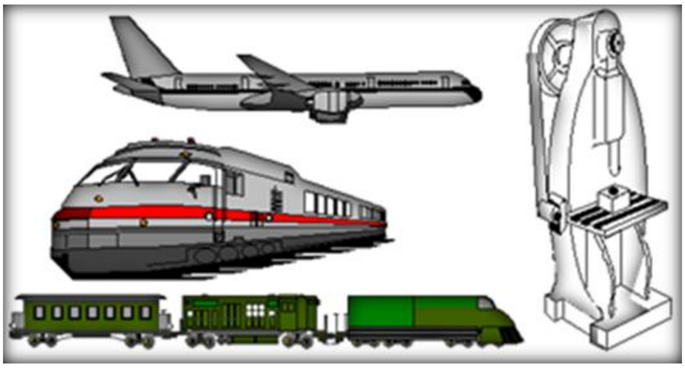


الجوانب السلبية للإهتزازات

إن الجوانب السلبية للإهتزازات هى الجانب الغير مرغوب فيه لما له من خواص تدميرية وتحطيميه فالتصاميم الإحترافية تأخذ في الإعتبار تقليل الإهتزازات قدر المستطاع وبالتالى يكون إهتزاز الماكينة غير مقصود وغير مرغوب فية "undesirable" ويمكن أن يؤدى إلى تدمير الماكينة. ويمكن أن تؤدى الإهتزازات إلى إنهيار أجزاء الماكينات الدوارة مثل المحركات والمولدات الكهربائية وكذلك إختلال حركة الأجزاء الدورانية والاحتكاك أثناء تشابك أسنان التروس وما إلى ذلك.



ومن الجوانب السلبية أيضا أنها تكون إهدارا للطاقة ومسببة للضوضاء والأصوات المزعجة المنبعثة منها. مثال ذلك الإهتزازت الناتجة من حركة الطائرات والبواخر وقطارات السكك الحديديه وإنهيار الكباري والجسور وأجنحة الطائرات.

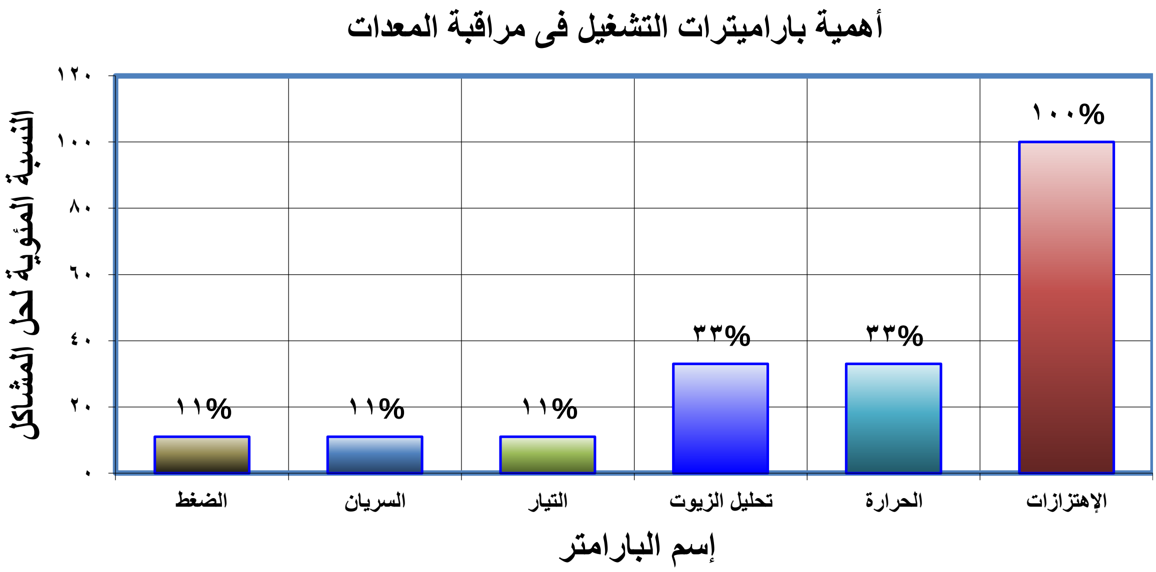


٣- الإهتزازات وباراميترات التشغيل

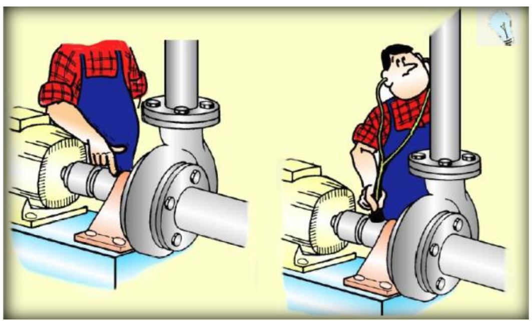
إن جميع البارامترات "Parameters" التى يمكن قياسها فى الصناعه لمراقبة المعدات مثل الحرارة "Temperature" والضغط "Pressure" والسريان "Flow" وتحليل الزيت "Oil Analysis" والتيار "Current" لا تحتوى على معلومات كثيرة كافية مثل التى تحتويها بصمة الإهتزازات "Vibration Signature" والحقيقه تبقى دائماً أن بصمة المعدات تحتوى على معلومات كثيرة عن صحة

الماكينات وسلوك تشغيلها أكثر بكثير من أى بارامتر آخر وبالتالى يظهر أهميتها فى مراقبة مشاكل المعدات كما هو موضح بالجدول الآتى:-

م	البارامترات / نوع عطل الماكينة	الحرارة	الضغط	السريان	تحليل الزيوت	التيار	الإهتزازات
١	عدم الإتزان	-	-	-	-	-	نعم
٢	إنحراف / إنحناء الأعمدة	نعم	-	-	-	-	نعم
٣	مشاكل رولمان البللى	نعم	-	-	نعم	-	نعم
٤	مشاكل كراسى السبائك	نعم	نعم	نعم	نعم	-	نعم
٥	مشاكل صناديق التروس	-	-	-	نعم	-	نعم
٦	مشاكل السيور	-	-	-	-	-	نعم
٧	مشاكل المواتير	-	-	-	-	نعم	نعم
٨	التفكك الميكانيكى "looseness"	-	-	-	-	-	نعم
٩	الرنين "Resonance"	-	-	-	-	-	نعم



٤- الطرق الأولية فى قياس الإهتزازات "Early methods"



لم توجد وسائل لمعرفة الإهتزازات ولم تكن هناك أجهزة لقياسها ولكن كانت تقدر "Evaluated" وذلك بلمس الماكينة بالإصبع أو نقل إشارة الإهتزاز من المنبع إلى الأذن بإستخدام عصا أو قضيب أو بإستخدام سماعة الطبيب "Doctor stethoscope" وفى كل حاله من الحالات السابقة تقدر إشارة الإهتزاز بالخبرة وبدون إستخدام القيم العددية للمساعدة فى المقارنة.

٥– القوى المؤثرة فى إهتزاز الماكينات الدوارة

إهتزاز الماكينات هو ببساطة حركة الماكينة أو أجزائها للآمام أو للخلف يقال عنها أنها تهتز. وإهتزاز الماكينة يمكن يأخذ أشكال مختلفة "various forms" فيمكن أن تهتز على مسافات كبيرة أوصغيرة بسرعة أو ببطئ ويمكن أن يصاحبها أو لا يصاحبها صوت أو حرارة محسوسة.

ولسوء الحظ أنه لا يمكن تثبيت مجسات الإهتزازات "Vibration transducers" على الروتر نفسه ولهذا يجب أن نتتبع سريان القوة من الروتر خلال كراسى التحميل إلى الأرضية "Foundation" ونقوم بتثبيت المجسات "Transducers" فى إتجاهات القوى بحيث تكون ملامسة للأجزاء الميكانيكية المثبت عليها العضو الدوار.

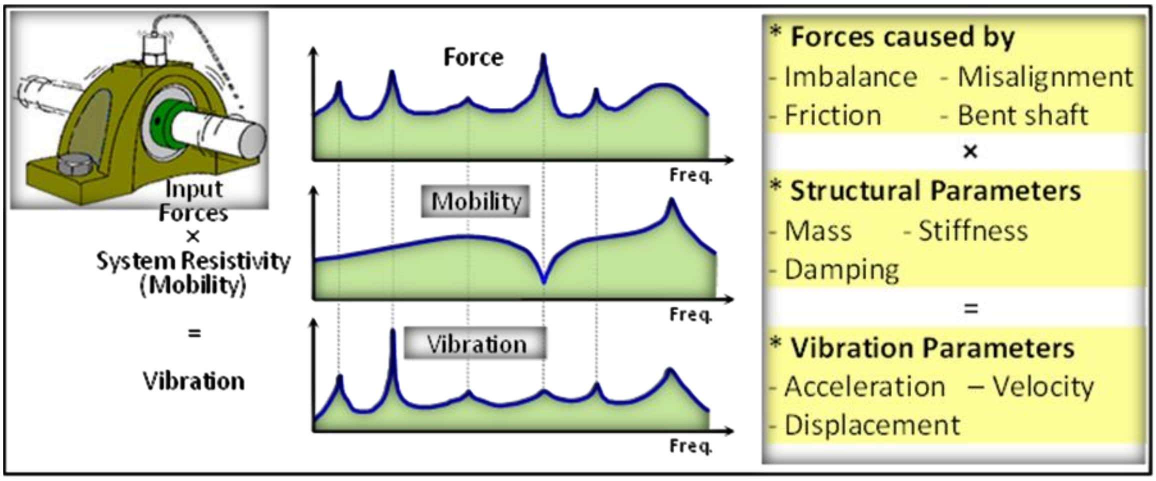
ومما هو جدير بالذكر أن حاصل ضرب بصمة القوى "Force spectrum" وبصمة قابلية الحركة "Mobility spectrum" ينتج عنها بصمة الإهتزاز "Vibration spectrum" كما لو تم قياسها من نقطة على سطح المعدة.

$$\text{Vibration} = \text{Force X Mobility}$$

ولأن المعادلات لوغاريتمية وبالدسيبل ودالة فى التردد فإنة يتم جمعها كلآتى:-

$$\text{Log V} = \text{Log F} + \text{Log M}$$

والشكل التالى يوضح مسار القوى من العضو الدوار إلى كراسى التحميل وأرضية المعدات كما أن المنحنيات الثلاث بالشكل يتم التعبير عنها لوغاريتمياً وبالديسيبل كدالة للتردد وعند الجمع الجبرى لكل من منحنى بصمة القوة ومنحنى بصمة قابلية الحركة فإننا نحصل على منحنى بصمة الإهتزازات.



ومن حسن الحظ أن قابلية الجسم للحركة "Mobility" عادة ما تكون ثابتة لمعظم المعدات وبالتالى عند زيادة القوة عند تردد معين يسبب زيادة فى الإهتزاز عند نفس التردد.

كما أنه إذا زادت قمة القوة الداخلية "internal force peak" عند تردد له قابلية حركة منخفضة " low mobility" سوف يتولد عن ذلك إهتزاز قليل كما بالشكل. وبالتالى غير كافى للنظر إلى القمم العالية فقط "Peaks" في بصمة المعدة ولكن البصمة كلها يجب أن تتابع لإكتشاف أي تغير فيها وإذا لم نتبع ذلك سيتم فقد معلومات مهمة في بصمة الإهتزاز.

مما سبق نرى أن الإهتزازات تعتمد على كل من القوى الآتية:-

٥-١- القوة الديناميكية "Dynamic force"

ومن المعروف أن إهتزاز الماكينات يكون نتيجة تأثير القوة الديناميكية "Dynamic force" وهى قوة متغيرة مع الزمن والتردد وتسبب طاقة ويمكن تمثيل هذه القوة بالحمل الديناميكى "Dynamic load" الذى يتميز بأنه يتغير مع الزمن وله ترددات مختلفة (أما الحمل الإستاتيكى "Static load" وهو ثابت مع الزمن وليس له تردد أى تردده صفر مثل التيار المستمر). وهذه القوة تعتمد إعتماداً كبيراً على كل من (الشكل + المادة + الأبعاد).

وتوجد عدة مصادر للقوة القسرية "Forcing function" والتى تحدث الإهتزازات القسرية منها:-

١- القوة المتولدة داخليا "Internally generated forces".

٢- عدم الإتزان الديناميكى للجزء الدوار.

٣- كسر أو إنهيار كراسى الدوران (رولمان البللى).

٤- عدم إستقامة محور دوران عمود المحرك مع المعدة التى يديرها.

٥- إنحناء العمود.

٦- تفكك مسامير القواعد.

٧- تآكل أو إنهيار وصلة الحركة (Coupling).

٨- تزييت زائد أو تزييت قليل.

٩- ترحيل مركز دوران الجزء الدوار (تروس- روتر- إلخ).

١٠- الأحمال الخارجية أو الزائدة "External loads".

١١- الإثارة الناتجة من البيئة المحيطة "Ambient excitation".

٥-٢- قابلية الحركة "Mobility"

والرسم يبين أنه كلما كانت قابلية الحركة عند القمم العالية "Peaks" أى أن الجسم يتحرك بسهولة وعند القمم المنخفضة لايتحرك بسهولة وهى عكس الممانعة "Resistivity".

Mobility = 1/Mechanical Impedance

وتعتمد قابلية الحركة "Mobility" على كل من (Damping + Stiffness + Inertia) وكلما زادت قابلية الحركة كانت حركة الجسم كبيرة وكلما قلت كانت قابلية للحركة صغيرة.

ومن حسن الحظ أن قابلية الجسم للحركة "Mobility"عادة ما تكون ثابتة لمعظم المعدات وبالتالى عند زيادة القوة عند تردد معين يسبب زيادة فى الإهتزاز عند نفس التردد.

٥-٣- الإهتزازات "Vibration"

والإهتزازات تعتمد على كل من القوة وقابلية الحركة (كلما زادت القوة زادت الإهتزازات حيث تعتمد القوة على كل من الشكل والمادة والأبعاد).

ويمكن تمثيلها ميكانيكيا كالأتى:-

Vibration = Force X Mobility

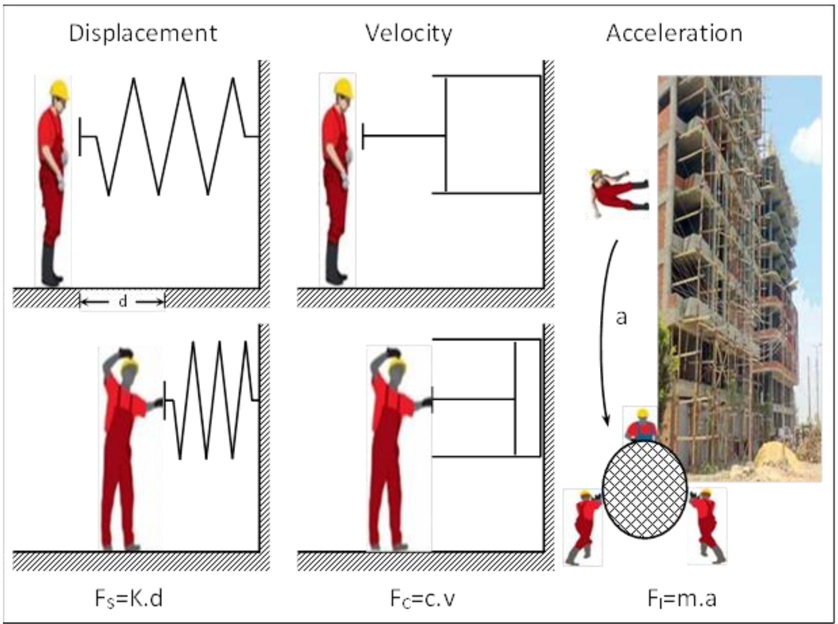
ويمكن تمثيلها كهربيا كالأتى:-

Current (I) = Volt (V) X 1/Resistance (R)

I = V X (1/R)

٦- مقاومة الجسم للإهتزازات "The resistance of body for vibration"

لايهتز الجسم إلا إذا ظهرت طاقة كبيرة داخلة لايستطيع أن يصرفها ولكنه يحاول مقاومة هذه الطاقة حيث يوجد ثلاث أنواع من المقاومة لهذه الطاقة.



٦-١- قوة القصور الذاتى (Fi) "Force of Moment of inertia"

إذا نظرت إلى الشكل السابق تجد رجل قفز من أعلى المنزل فسقط بعجلة ويتعرض لقوة أثناء سقوطه على فرقة الإنقاذ وهذه القوى هى :-

(Force of inertia= Mass X acceleration)

Fi = m x a

أى أن قوة القصور الذاتى ناتجة من كتلة الجسم فى وجود عجله ويتوقف هذا القصور الذاتى (Fi) على الكتلة (m) فإذا كانت كبيرة لايمكن أن يتحرك الجسم وكلما كبرت الكتلة تحتاج إلى (Fi) عالية حتى تقاوم هذه الكتلة.

وتعتبر كتلة الجسم ثابتة وبالتالى يمكننا القول أن قوة القصور الذاتى (Fi) تتناسب مع العجلة (a).

$$Fi \propto a$$

أى أنه إذا كانت الطاقة كبيرة فإن الجسم يتحرك بعجلة كبيرة والعكس صحيح.

٦-٢- قوة الصلادة (Fs) "Force of Stiffness"

إذا نظرت إلى الشكل السابق أيضاً تجد رجل يحاول أن يؤثر بقوة على السوستة أو الياى "Spring" فيحركه بمشوار (إزاحة) مقدارها (d) وعندما تكون السوستة مرنه (ليست صلدة) تكون الإزاحة (d) كبيرة. أى أن القوة المؤثرة Fs على السوستة تتناسب طردى مع الإزاحة (d) تبعاً للعلاقة الآتية:-

(Force of stiffness = Displacement X Stiffness)

$$Fs = d \times k$$

أى أن قوة مقاومة الصلادة (Fs) "Force of Stiffness" ناتجة من حاصل ضرب الصلادة (k) "Stiffness" فى الإزاحة (d) "Displacement".

ومن العلاقة السابقة نجد أن الصلادة (k) "Stiffness" (عكس المرونة "Elasticity" حيث أن الجسم المرن يطوح مثل الشجرة الطرية وبالتالى تكون المرونة إحدى مقاومات الإهتزازات) تتناسب تناسباً عكسياً مع الإزاحة (d). معنى ذلك أن الجسم الذى له "Stiffness" عالية تكون الإزاحة له صغيرة والجسم الأقل فى الصلادة أى أكثر مرونة تكون الإزاحة له عالية. ويطلق على هذه القوة الخارجية Fs لأن الصلادة "Stiffness" إحدى العوامل المؤثرة على الإزاحة.

٦-٣- التخميد (Fc) "Damping"

إذا نظرت إلى الشكل السابق تجد رجل يحاول أن يؤثر بقوة على المكبس "Piston" لكى يتحرك ولكن نتيجة للإحتكاك الداخلى أو الخارجى فإن سرعة حركة المكبس تقل ولو كان بدون إخماد كانت سرعته أعلى، أى أن معامل الإخماد هو الذى يؤثر على السرعة وبالتالى يقال على القوة المؤثرة (Fc) قوة الإخماد "Force of damping" تبعا للعلاقة الآتية:-

Force of damping = Damping X Velocity

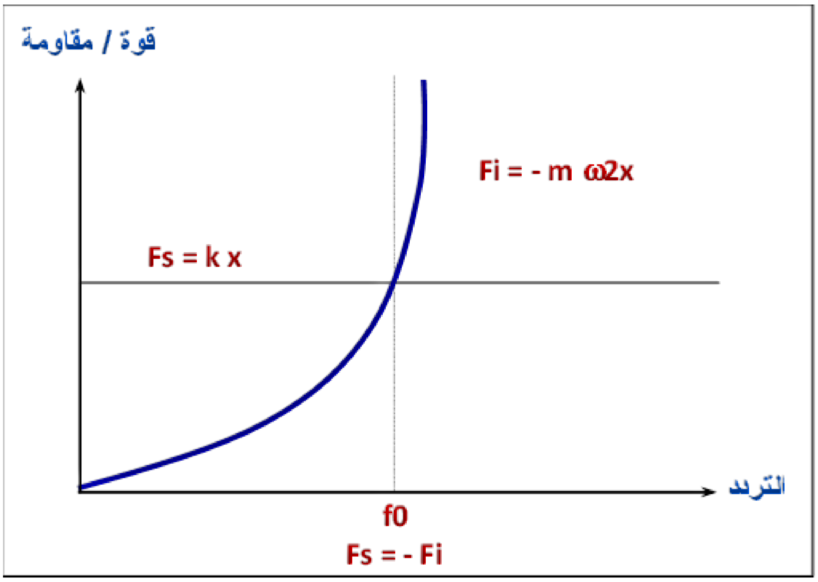
$$Fc = c \times v$$

ويتناسب معامل الإخماد (c) مع السرعة (v) تناسب عكسى فلو كان معامل الإخماد كبير "Damping factor" الجسم لا يسرع.

ومن المعروف أن بعض التخميد طبيعى والبعض الآخر صناعى وهو وسيلة لتبديد الطاقة مثل الإحتكاك كلما كبر بدد الطاقة ولوإستطعنا وضع مخمد للطاقة يستطيع أن يسرق هذه الطاقة (مثل السوست) وبالتالى لايهتز الجسم. أو بمعنى آخر يمكننا تقليل الإهتزاز عن طريق زيادة التخميد.

٧– العلاقة بين قوى مقاومة الجسم الميكانيكية للإهتزاز

إذا أثرت قوة ديناميكية أو ضغط ميكانيكى (قوة تتغير مع الزمن) على جسم فإنه ينتج عنها إهتزاز ونتيجة للمقاومة الميكانيكية للجسم والتى تتمثل فى "Stiffness – Inertia - Damping" فإنها تقاوم هذه الإهتزازات والرسم يوضح العلاقة بين القوة / المقاومة والتردد.



٧–١– فى حالة الصلادة "Stiffness"

وهى قوة / مقاومة مقدارها ثابت وتكون فى إتجاه الحركة وليست دالة فى التردد ولكنها تعتمد فقط على الإزاحة (Fs=k x) حيث x تمثل الإزاحة X = x sin ωt.

٧–٢– فى حالة القصور الذاتى "Inertia"

عند إثارة جسم له كتلة تكون له قوة / مقاومة "inertia" وهى قوة / مقاومة تنمو مع التردد لأنها دالة تزايدية "parabola" ($Fi = m\ \omega^2 x$).

Fi = mass × acceleration

Acceleration = $\omega^2 x$

Fi = - m $\omega^2 x$

X = x sin ωt

v = dx/dt = x ω cos ωt

a = dv/dt = - x ω^2 sin ωt

إذا كان كل من السرعة والعجلة دالة فى الإزاحة والتردد.

ومن ١ ، ٢ يتضح الآتى:–

مما سبق يتضح أن هناك قوتان تقاوم الإهتزاز لجسم له كتلة وصلادة عند إثارته بقوة ديناميكية خارجية ترددانها مختلفة حيث إحدى هاتين القوتين (الصلادة) ثابتة وليس لها علاقة بالتردد والقوة الأخرى (القصور الذاتى) تزداد مع التردد ولحسن حظ الجسم أن هاتان القوتان تعملان عكس بعضهما (متضادتان إحداهما تشده من جهة والأخرى تشده من الجهة الثانية) حيث تقوم الصلادة بمقاومة حركة الجسم فى إتجاه الحركة والقصور الذاتى يقاوم حركة الجسم فى عكس إتجاه حركته.

ومن الرسم يتضح الآتى:-

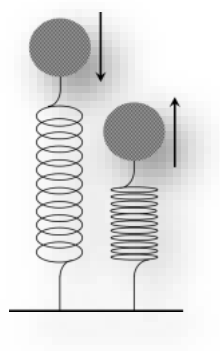
عند زيادة التردد تزداد تبعاً لذلك "inertia" وتكون "stiffness" قيمتها أعلى.

وبزيادة التردد تدريجياً يقل الفرق بينهما وتزداد قيمة "inertia" إلى أن تتساوى مع "stiffness" (Fs = -Fi) - ويكون الجسم عند تردده الطبيعى "F0" وبالتالى يكون الجسم فى مهب الريح وليس له مقاومة (لأنها مقاومتان متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الإتجاه) ويكون الجسم فى موضع حرج وأى قوة ولو كانت صغيرة من الممكن أن تدمر الجسم.

وأحياناً لا يتم تدمير الجسم لأننا اهملنا عامل آخر وهو الإخماد "damping" والذى يظهر تأثيره القوى حول التردد الطبيعى للجسم "F0". وبإستمرار زيادة التردد تزداد "inertia" وبالتالى يزداد الفرق بينهما وبين الصلادة "stiffness".

٨- فلسفة الإهتزازات

لو تجنبنا الإخماد ونظرنا إلى المرونة والقصور الذاتى فإن طاقة الوضع للكورة تتحول إلى طاقة حركة للسوستة (كرة وسوستة) ويتم تبادل الكورة والسوستة لطاقة الوضع وطاقة الحركة.



أى أن الإهتزاز هو تبادل للطاقة (بين طاقتى الوضع والحركة) ويمكن للجسم فى هذه الحالة أن يهتز بإستمرار طالما طاقة الحركة تتحول إلى طاقة وضع ولو وجد من يسرق هذه الطاقة ويبددها فلا يهتز الجسم. والله سبحانة وتعالى خلق شئ داخل الأجسام لإخماد هذه الحركة وهو التخميد "Damping".

ويمكننا منع الإهتزاز وذلك بزيادة كل من القصور الذاتى "Moment of inertia" و الصلادة "Stiffness" وتقليل الإهتزاز بزيادة التخميد "Damping".

٩- الإهتزازات وقياس الصوت

من الضروري القول بأن هنالك ارتباطاً وثيقاً بين دراسة الصوت "sound" ودراسة الاهتزازات. فالصوت عبارة عن"موجات ضغط" يتم إنشاؤها بواسطة أجسام اهتزازية (مثل الحبال الصوتية) وأيضاً يمكن لهذه الموجات هز أجسام كطبلة الأذن وغالباً ما يكون حل مشاكل الضجيج مرتبطاً بمحاولة التقليل من الاهتزازات المسببة له. وأصبح قياس الإهتزازت فى السنوات الأخيرة واحداً من أهم الوسائل الشائع إستخدامها للحكم على حالة الماكينات الدوارة وهذا يعتمد إعتماداً كبيراً على الإهتزازات والإرتجاج أكثر منه على قياس الصوت وذلك أنه فى معظم الأحوال وعند إنبعاث إشارات الصوت من سطح الماكينة إلى الميكروفون ينتج عنه خفض فى نوعية الإشارة الملتقطه بواسطة هذا الميكروفون وعلى كل حال فإن قياس الصوت يعطى إنطباعاً شاملاً على حالة الماكينة فقط ولكنه لا يستخدم فى تحليل وتشخيص الأعطال.

١٠- أنواع الاهتزازات "vibrations types"

١٠-١- الإهتزاز الحر "Free vibration"

وفيه يهتز النظام الميكانيكي بحرية "بتردده الطبيعى" ثم يعود إلى حالة السكون "أى لا يوجد أي قوة خارجية تؤثر على الجسم" ويحدث عندما يهتز النظام الميكانيكي بسبب حركة أولية، ثم تركه ليهتز بحريه ومن الأمثلة على هذا النوع من الاهتزاز عندما يتم سحب الطفل على أرجوحة وتركه ليتحرك بحريه ، أو ضرب شوكة رنانة والسماح لها بالرنين.

١٠-٢- الإهتزاز القسري"Forced vibration"

وفيه تردد الاهتزاز هو تردد القوة أو الحركة المؤثرة ويحدث عندما يهتز النظام الميكانيكي متأثراً بقوة خارجية متناوبة ومن الأمثلة على هذا النوع من الاهتزاز إهتزاز غسالة الملابس بسبب فقدان التوازن والاهتزاز في وسائل النقل (الذي يسببه محرك الشاحنة، والطرق، الخ)، أو اهتزاز المبنى أثناء وقوع زلزال.

القسم الثانى :- أنواع صيانة الماكينات "Type of maintenance"

مقدمه:-

للصيانة أهمية كبيرة في كافة مجالات حياتنا وخاصة في مجالات الإنتاج والخدمات ، والصيانة فى اللغة مشتقة من فعل (يصون) أى يحافظ وصان الشيء أي حافظ عليه وأدامه وجعله يؤدى وظيفته لمدة طويلة. ومطلوب خلق وزيادة (الوعى الصيانى) على كافة المستويات وهذا لا يأتى بالكلام عن الصيانة فحسب ، بل يجب أن يقترن ذلك بالإيضاح العلمى لأهمية الصيانة ، وعلاقة ذلك بزيادة الإنتاج وهو الهدف الكبير الذي نسعى إليه ، فمن البديهى أن الصيانة مرادف لزيادة الإنتاج ، بل إننا لا نبالغ إذا قلنا أنه بدون صيانة أو باستخدام الأساليب البالية للصيانة فإنه لا يمكن الوصول إلى إنتاج كبير وجيد. وكثيراً ما نسمع بأن الإنتاج وأقسامه المختلفة يعتبر هو الأساس ويتمتع بميزات أكبر وتأتى الصيانة والإختبارات والمعامل ومراقبة الجودة في المرتبة الثانية باعتبارها أقسام مساعدة للإنتاج.

وهذا خطأ إذ أن العكس هو الصحيح فهذه الأقسام هى الأساس في جودة الإنتاج وزيادته ولابد من الاهتمام بها وتطويرها وتحديثها بمعدات وأجهزة وتوفير العمالة الفنية ذات الكفاءة العالية.

كانت الفلسفة ببساطة ولسنوات عديدة (وكثير من المصانع حتى يومنا هذا) الحفاظ على إستمرارية تشغيل المصانع "keep the plant running" وإذا تعطلت الماكينة يتم إصلاحها أو تشغيل الماكينة الإحتياطية وقليلاً من التفكير فى تحسين كفاءة المعدات أو توقع العطل.

وكان قسم الصيانة بالوعة للتكلفة الهائلة واعتبرت هذه التكلفة مجرد جزء من إدارة الأعمال.

وفي الآونة الأخيرة تم تغيير تلك الفلسفة وبدأت الإدارة تتفهم بأن الأمر يستحق استثمار الوقت والمال لتغيير طرق الصيانة والعمل على تحسين كفاءة المعدات.

وهناك أربعة أنواع رئيسية من الصيانة:-

١- الصيانة عند الكسر (العلاجية) "Break down maintenance"

وهى طريقة بدائية وتعتبر من أقدم الصيانات تاريخياً ويطلق عليها الصيانة الكارثية "Catastrophic" أو الهرعيه "Hysterical" أو صيانة رد الفعل أو صيانة الأعطال (الصيانة بعد تعطل الماكينة) وتتمثل فلسفة هذا النوع من الصيانة هى أن تظل المعدات تعمل حتى حدوث العطل " run to failure" أو السماح لها بالكسر "just let it break" دون إتخاذ أى إجراء وقائى " preemptive action" وهذا نهج ومخطط صيانة غالى جداً "very high maintenance cost" لأنه يسبب أضرار ثانوية للماكينة "Secondary damage" (أى من الممكن كسر عمود الدوران عند إنهيار رولمان البللى) وكذلك توقف الإنتاج "production downtime" وزيادة تكلفة حفظ قطع الغيار الإحتياطية "cost of keeping spares" والوقت الإضافى للعمال "over time labor" وهذا عدد

قليل من التكاليف الكبيرة التى تنتج من العمل بهذا الإسلوب "approach" فى الصيانة. وهذا الأسلوب يؤدى إلى فقدان السيطرة أو التحكم لإمكانية إنهيار أى جزءِ فى الماكينة فى أى وقت مما يؤثر على الإنتاج والسلامة "safety".

حتى لو الأذن المدربة إكتشفت المشكلة قبل حدوثها "before failure occurs" وقبل الضرر الثانوى "secondary damage" ولكن ستظل هناك خسارة كبيرة فى الإنتاج "loss of production" عندما يتم الإصلاح.

فهذه الطريقة التى كانت تستخدم فى الماضى منذ عام ١٩٥٠ على ماكينات ذات سرعات منخفضة من المضحك إستخدامها اليوم، نظراً لتكلفة المعدات الحديثة ذات السرعات العالية وزيادة تكلفة إصلاحها وزيادة المجهودات لتحسين جودة المنتج مما يستدعى ملاحظة المعدة قبل حدوث الإنهيار وإنجاز الصيانة المطلوبة.

١-١- المزايا "Advantages"

لا يوجد تكلفة ذات صلة بأجهزة مراقبة حالة الماكينات ولا معدات الصيانة الوقائية.

١-٢- العيوب "Disadvantages"

١- التوقفات الغير متوقعة "Unanticipated down time".

٢- الأضرار الثانوية "Secondary damage" والأعطال الكارثية "Catastrophic failure"

٣- خسارة فى الإنتاج "Loss of production".

٤- ارتفاع تكاليف الإصلاح "High repair cost".

٥- عدم وجود رقابة "Lack of control".

٢- الصيانة الوقائية (المخططة) "Preventive maintenance"

الصيانة الوقائية والمعروفة بتعريفات مختلفة مثل الصيانة المخططة "planned maintenance" أوالصيانة الدورية "Periodic Maintenance" أو الصيانة المبرمجة على التقويم "calendar-based maintenance" أو"Time Based Maintenance" والصيانة التاريخية "historical maintenance" والمعتمدة على الخبرات السابقة والتى تبنى على متوسط الزمن بين الأعطال الحادثة "Main time between failure".

وتتمثل فلسفة هذا النوع من الصيانة فى "إصلاح العطل قبل وقوعه "fix it before it breaks".

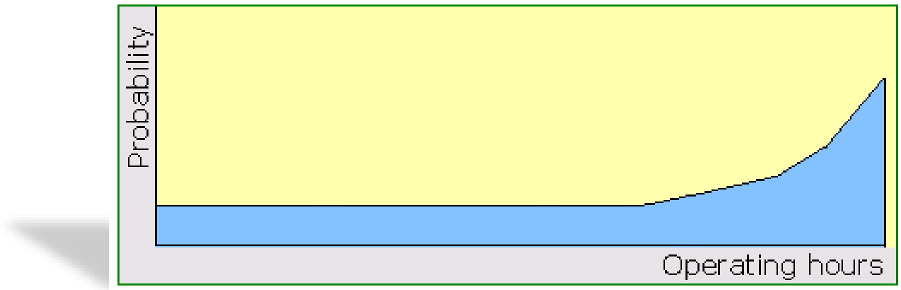
والنظرية أن عمر الماكينة محدودة "limited" وإحتمالية العطل يزداد مع عمر الماكينة وبالتالى نقوم بإجراء الصيانة قبل أن نحتاج إليها وبذلك نتجنب الأعطال وزيادة عمرالماكينات.

ويتمثل التحدى "challenge" فى هذا النوع من الصيانة فى تقدير العمر "estimated life" للماكينة وإجراء الصيانة الشاملة "overhaul" قبل قليل من أن تتعطل ونحاول الموازنة بين المخاطر "risk"

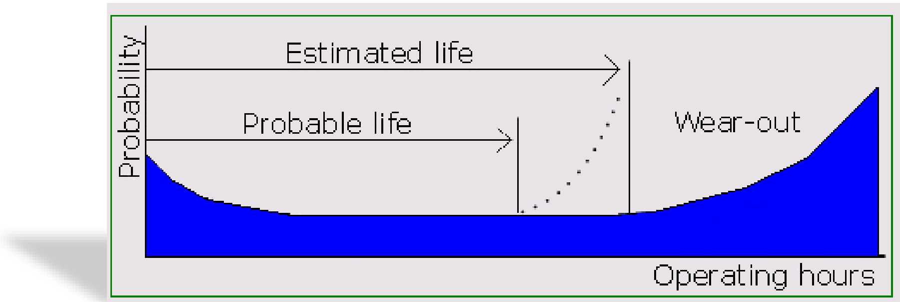
والتكاليف "cost" والمشكلة تتمثل فى تحديد الفترة الزمنية المناسبة بين كل صيانة وأخرى فإذا طالت فترة الصيانة ربما إنهارت الماكينة وإذا أنجزنا الصيانة فى وقت مبكر تصبح مكلفة للغاية فى العمالة "labor" وخسارة الإنتاج "lost production" وقطع الغيار "parts" وعموماً يعتمد إختيار هذه الفترة الزمنية على نوع الماكينة وأهميتها بالنسبة للإنتاج وسلوك أجزائها.

يظهر فى الرسم البيانى إحتمالية العطل "probability" مع الزمن (عدد ساعات التشغيل) "operating hours".

وإذا إفترضنا أن الماكينة تدور بنعومة وتعمل بطريقة مرضية لمدة طويلة فإن إحتمال العطل يصبح منخفضاً إلى أن يحدث تآكل "wear" وإجهاد "fatigue" فى أجزاء الماكينة ويزداد إحتمال العطل كما هو مبين بالرسم البيانى الآتى:-



ولكن إنتظر ...... ماذا عن أعطال ما بعد الصيانة؟ والحقيقة المؤسفة هو أن هناك إحتمال كبير "probability" للعطل بعد الصيانة الشاملة "overhaul" لأسباب كثيرة منها ضعف التشحيم "poor lubrication" إما كثير جداً أو قليل جداً "too much or too little" أو عدم دقة المحاذاة لمحاور المعدات "poor alignment" أوعدم الإتزان "unbalance" للأجزاء الدوارة وأسباب أخرى كثيرة ومن ذلك يمكن أن يتغير المنحنى على النحو الآتى:-

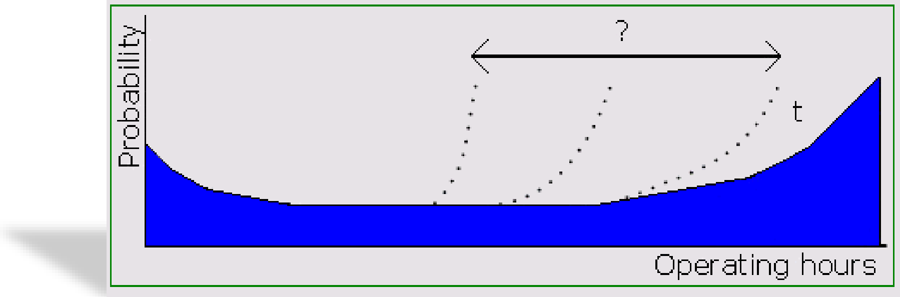


هذا المحنى يشبة شكل البانيو ويسمى "bath-tup" وفيه عند بداية المنحنى يظهر الجزء الخاص بفترة مابعد الصيانة مباشرة أى فترة التليين "infant mortality section" وعند نهاية المنحنى يظهر الجزء الخاص بحالة الماكينة بعد بدء التآكل التدريجى فى أجزاء الماكينة "wear-out".

والجزء الأوسط من المنحنى والمعروف بالمقطع المسطح "flat section" ويظهر العمر المستنتج "estimated life" والذى نفترض من بعده يبدأ التآكل "wear-out" وتفاقم المشكلة ويظهر أيضاً الجزء الخاص بالعمر المحتمل "probable life".

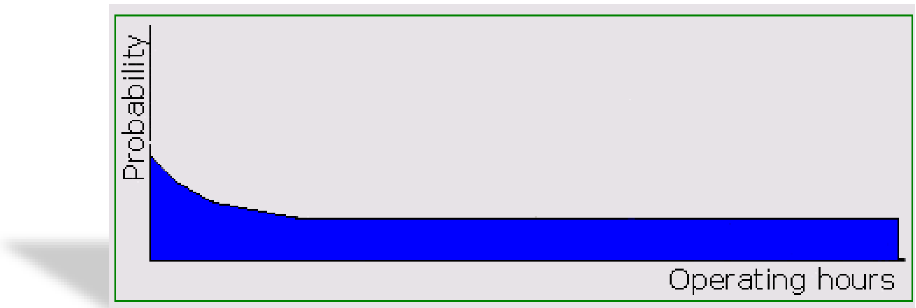
أى أنه يجب أن يسبق العمر المحتمل "probable life" العمر المستنتج "estimated life" أى أن إحتمالية العطل "probability of failure" تزداد قبل أن يجب أن يحدث "fail" ولذلك نقوم بزيادة طول المقطع المسطح "flat section".

لذلك فإنه من المفروض أن تكون جدولة أعمال الصيانة داخل فترة إحتمالية العمر "probable life" و للأسف لا نعرف ما هى تلك الفترة ولا نعرف سرعة الإنهيار بعد بدء التآكل التدريجى "wear-out".



ونحن بصدد حالة تتكرر فيها أعمال الصيانة على ماكينات تعمل بشكل مرضى ومما يزيد الطين بلة هو أن بعض الماكينات لاتزال تنهار أيضاً حتى لو توقعنا أن إحتمالية الإنهيار ضعيفة.

وقد أجريت دراسة منذ بضع سنوات (من يونايتد ايرلاينز) لدراسة كيف أن إحتمال الفشل يتغير بمرور الوقت وجاءت الدراسة بحقيقتان مهمتان.



النقطة الأولى: هو أن هذا المنحنى لايشبه دائما شكل البانيو "bath-tup" حتى الآن مع العلم بأن أشكال المنحنيات الموجودة حاليا محسوبة فقط لـ ٦% من الماكينات وفى معظم الحالات كان الشكل مسطح بنسبة ٦٨٪ بعد فترة التليين الأولى (أى ما بعد الصيانة).

النقطة الثانية: (وهو مايفسر الجزء المسطح من المنحنى) هو أن ١١% فقط من حالات الفشل ترجع إلى عمر الماكينة فى حين ٨٩% عشوائى وهذا لا يعنى أنه من المرجح أن تفشل بعد شهرين كما كانت تفشل فى ٢٢ شهر.

ولهذا فإن مفهوم "concept" الصيانة القائمة على التقويم "calendar-based maintenance" يعتبر معيباً "flawed".

والخبر السار هو أن الماكينات عادةً ما تعطى بعض العلامات "signs" قبل الفشل وهو تغير فى الإهتزازات والحرارة والصوت والأداء "performance" أو ملاحظة الجزيئات المعدنية "metal particles" فى مواد التشحيم "lubricant" والتغير فى التيار الكهربى للموتور أو بعض علامات التغيرات الأخرى والتى تنقلنا إلى فلسفة أخرى للصيانة وهى الصيانة التنبوية.

٢-١- المزايا "Advantages"

١- تنفيذ الصيانة في الوقت المناسب بطريقة مسيطر عليها.

٢- تقليل الأعطال المتوقعة وبالتالى تقليل الأعطال الكارثية "catastrophic failures" ومعوقات الإنتاج.

٣- زيادة القدرة على التحكم فى مخزون قطع الغيار والتكاليف.

٢-٢- العيوب "Disadvantages"

١- لا تعتمد على حالة الماكينة ولكن تعتمد على الزمن المنقضى من حدوث الصيانة السابقة.

٢- تكرار "frequently" الإصلاح "repaired" بدون الحاجة إليها لعدم وجود مشاكل.

٣- تغيير بعض الأجزاء السليمة وتظهر لنا الماكينة كل مرة بحالة وشكل جديد.

٤- إمكانية حدوث أعطال "breakdowns" غير مخططة "unscheduled" قبل إجراء الصيانة.

٥- جدول الصيانة موحد لجميع الماكينات ولا يتناسب مع متطلبات كل ماكينة أومتوسط أعمارها.

٢-٣- أنشطة الصيانة الوقائية

يتم تنفيذ الأنشطة الآتية فى فترات زمنية وبتكرارية محددة يعتمد تحديدها على خبرات القائمين بالتشغيل والصيانة وكذلك تعليمات جهات التصنيع والجهات الموردة والمدونة بالكاتالوجات أو مراجع التشغيل والصيانة.

فعلى سبيل المثال هناك أنشطة تتم يومياً كمراجعة قراءة العدادات المختلفة ومراجعة مستوى زيوت التزييت لإكتشاف أى تسرب للزيوت والماء.

٢-٣-١- استخدام الحواس "feeling"

يستخدم فنى التشغيل والصيانة حواسهما من (بصر- سمع - شم- لمس- تذوق).

حاسة البصر: وتستخدم فى تسجيل القراءات المختلفة من (حرارة - ضغوط - تصريفات- تيار كهربى- جهد كهربى- .. إلخ).

وتراجع هذه القراءات مع القراءات النموذجية وكذلك إكتشاف أى تسرب للمياه من توصيلات المواسير أو حشوات (Seals) المضخات .. إلخ أو التفتيش على المعدات الدوارة وتدوين الملاحظات وبالتالى نتمكن من معرفة أماكن الخلل أو الإصلاح إن أمكن أو تبليغ المسئول.

حاسة السمع: ويستخدم حاسة السمع فى تمييز الأصوات غير العادية التى تنجم عن هزات غير عادية فى الآلات الدوارة نتيجة عدم ضبط إستقامة المحاور أو فك صواميل التثبيت أو إحتكاك الأجزاء بعضها البعض.

حاسة الشم: كما يستخدم حاسة الشم فى إكتشاف الروائح التى تنجم عن احتراق عوازل كهربية نتيجة سخونة زائدة أو نتيجة زيادة الأحمال الكهربية.

حاسة اللمس: ويستخدم حاسة اللمس فى إكتشاف السخونة الزائدة فى الكراسى والمراوح والمحركات والطلمبات وصناديق التروس.

٢-٣-٢- الفحص "Inspection"

لا بد من إجراء الفحوصات اللازمة لأي آلة أو منشأة من وقت لآخر فهى تفيد فى الوقوف على حالة الأجزاء المختلفة للآلة والتعرف على الأجزاء التى أوشكت على التغيير وذلك بفحص ومراجعة فراغات حلقات التآكل بمضخات المياه أو حلقات "Rings" مكابس المحركات أو فحص الكراسى..الخ.

٢-٣-٣- التثبيت "Tightening"

إعادة تثبيت المعدات والآلات أمر هام لضمان سلامتها حيث أن الآلات والمعدات الدوارة تتعرض أجزاؤها وقواعد تثبيتها للفك. فمن الضرورى كل فترة زمنية محددة يتم مراجعة تثبيتها منعاً لوقوع أعطال جسيمة بالآلات.

٢-٣-٤- النظافة "Cleaning"

النظافة تساعد على أن تعمل الآلات والأجهزة الدقيقة كالأجهزة الكهربائية وأجهزة الحماية والتحكم والقياس بصورة جيدة – والنظافة هامة بالنسبة للمحركات – كما أن النظافة (الدهانات) تعمل على حماية المعدات – وكذلك نظافة العنبر يحمى العمال ضد أخطار الانزلاق والحرائق.

٢-٣-٥- التزييت والتشحيم "Lubrication"

يجب إتباع تعليمات الجهات الصانعة والجهات المختصة بإنتاج زيوت التزييت فى إختيار أنواع الزيوت والشحوم المناسبة لكل آلة وظروف تشغيلها والزيوت والشحوم التى تناسب الصيف والشتاء. كما يجب عدم الإفراط فى إستخدامها وضرورة الإلتزام بالمقادير المحددة حيث أن الإفراط فى استخدام الزيوت والشحوم يساعد على زيادة درجة حرارة.

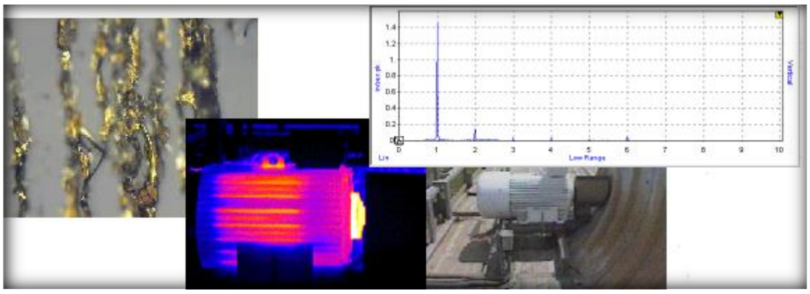
٣- الصيانة التنبؤية "Predictive maintenance"

تعرف ببعض المصطلحات وأكثرها شيوعاً هى الصيانة القائمة على حالة المعدة "condition based maintenance" وتتمثل فلسفة هذا النوع من الصيانة فى (إذا لم يتم الكسر، لاتصلحها) "if it isn't broke, don't fix it!".

والصيانة التنبؤية هي أحد أساليب إدارة الصيانة الحديثة والتي بدأ تطبيقها في الدول الصناعية المتقدمة في نهايات السبعينات وبدايات الثمانينات من القرن العشرين وتعتبر تطوراً لأساليب الصيانة التقليدية مثل الصيانة الوقائية.

تعتمد الصيانة التنبؤية على مبدأ مراقبة الحالة "Condition Monitoring" للماكينة أو المعدة من أجل التنبؤ بنوع وميعاد العطل قبل حدوثه مما يترتب عليه توفير المال أكثر من أى نوع من أنواع الصيانة الأخرى "الصيانة الدورية أو الوقائية" لأن الإصلاحات تتم فقط عند الحاجة "قبل حدوث العطل" بالإضافة إلى أنها تكون مخططة ومدروسة وتحت السيطرة ويتم ذلك باستخدام عدة تقنيات من أهمها قياس الاهتزازات الميكانيكية وتحليلها "Vibration Measurements and Analysis" (وهي أهم تقنيات الصيانة التنبؤية) وكذلك الفحص البصري "Visual Inspection".

ونحن نعلم بأن الماكينات الدوارة عادةً ما تعطى علامات تحذير "signs" قبل العطل مثل تغير مستوى الإهتزازات وتغير شكل بصمة الإهتزاز وزيادة حرارة بعض أجزاء الماكينة وتغير الصوت والأداء "performance" أو وجود جزيئات معدنية "metal particles" فى مواد التشحيم "lubricant" وتغيرالتيار الكهربى للموتور أو بعض علامات التغيرات الأخرى.

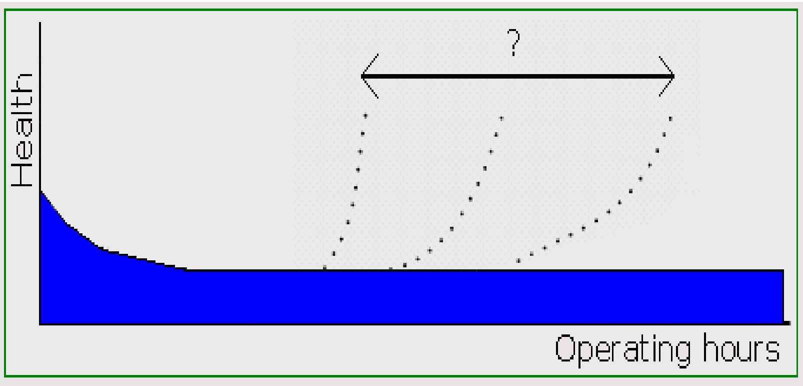


إذا كنا نستطيع مراقبة حالة الماكينات بهذه العلامات "signs" والتنبؤ بالأعطال فى وقت مبكر وتخطيط أعمال الصيانة المطلوبة فى الوقت المناسب وقبل تدهور حالة المعدات وتوفير قطع الغيار

اللازمة والعمالة المدربة لإنجاز المهمة وبالتالى نزيد من عمرها ونقلل من تكاليف الصيانة "maintenance costs" لعدم وجود توقفات "downtime" ولا أعطال بشكل غير متوقع "unexpectedly" ولا أعطال كارثية "catastrophic" ولا أعطال ثانوية " secondary damage". وهذا نظرياً يمكن تحقيقه بفرض أن جميع الماكينات يتم مراقبتها بشكل كامل " fully monitored" وأن كل عطل يعطينا مؤشر مناسب بضعة أشهر قبل الإنهيار.

والحقيقة أنه من الصعب مراقبة كل الماكينات بهذه الطريقة لزيادة التكلفة ولأن الماكينات لاتعطى دائما تحذيرات كثيرة "much warning" قبل الإنهيار بقدر ما نريد.

والآتى منحنى جديد يظهرالعلاقة بين صحة الماكينة "health" مقابل الزمن "operating hours".



ومع فرض أن هناك جزء من المنحنى يشير إلى فترة ما بعد الصيانة مباشرة أى فترة التليين "infant mortality section" وفيها يتم مراقبة الماكينة عن قرب خلال هذه المرحلة.

وفى مرحلة ما خلال الجزء الأوسط من المنحنى والمعروف بالمقطع المسطح "flat section" سيبدأ تغير فى صحة الماكينات "health will begin to deteriorate" ومعدل التغير الذى سيؤدى إلى الإنهيار غير معروف.

فن الصيانة التنبؤية هو مراقبة الماكينات بالتكنولوجيا المناسبة والتى تكفى فى كثير من الأحيان للكشف عن الانهيار المتوقع مع تحقيق التوازن بين العائد المادى ومخاطر الأعطال لأنها قضية مالية فى المقام الأول.

وعند تطبيق برنامج الصيانة التنبؤية يجب إختيار التكنولوجيا الصحيحة والتكيف مع البرنامج لرصد حالة الماكينات ويلزم ذلك تقييم كل ماكينة وإختيار معدل المراقبة الصحيح لكل ماكينة والذى يمكن تغييره مع تقادم عمر الماكينات.

ومن ناحية أخرى يمكن تثبيت أنظمة مراقبة دائمة على المعدات الهامة والحرجة الهدف منها الحفاظ على مراقبة دائمة على مدار ٢٤ ساعة ويمكن أن تطبق فلسفة "run to failure" على بعض الماكينات لأنه لايوجد مبرر إقتصادى لمراقبة حالتها.

ويجب الموازنة بين المخاطر "risk" والتكاليف "cost" وأداء الحد الأدنى "minimal" من المراقبة على الماكينات الأخرى.

ولكن هناك ضعف فى الصيانة التنبؤية حيث أنه ببساطة نراقب الماكينات وإجراء الصيانة عند الحاجة ولم نفعل أى شئ لإطالة عمر الماكينات ولكننا فقط نعطى مجرد تحذير سابق للعطل.

لو تمكنا من تغيير طريقة الشراء وتشغيل وصيانة الماكينات بحيث تصبح الماكينات أكثر موثوقية وإطالة عمرها مع خفض تكاليف الصيانة وبالتالى ننتقل إلى فلسفة أخرى للصيانة وهى الصيانة الاستباقية "Proactive maintenance".

٣-١- المزايا "Advantages"

١- تقليل وقت توقف الإنتاج.

٢- قطع الغيار تطلب وتستخدم عند الحاجة.

٣- تنفيذ أعمال الصيانة فى الوقت المناسب.

٤- تخفيض النفقات بنسبة تتراوح ما بين ٨ إلى ١٢ % مقارنة باستخدام الصيانة الوقائية.

٥- تحسين بيئة العمل والأمن الصناعي.

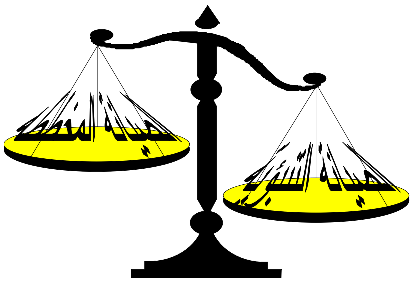
٣-٢ العيوب "Disadvantages"

١- تكلفة الأجهزة والبرامج والأفراد المستخدمة فى تطبيق الصيانة التنبؤية.

٢- لا ضمان لتمديد عمر الماكينات.

٣-٣- الخلاصة

الحل الأمثل بين ترك الماكينة إلى أن تتكسر دون صيانة أو الخوف عليها وزيادة معدل الصيانة لها دون داع يتمثل في الصيانة التنبؤية (الصيانة الحديثة) والتي تتضمن صيانات وقائية على فترات (غير منتظمة) وتحدد تلك الفترات الزمنية للصيانة حسب الحالة الفعلية للماكينة أي تجرى الصيانة في الوقت والمكان التي تحتاج فيها الماكينة فعلاً للصيانة.



إن استخدام طرق الصيانة المتقدمة سوف يقلل من تكلفة الصيانة بحد كبير ونضرب مثال لذلك بدولة اليابان حيث أنه بلغت تكاليف الصيانة في سنة ١٩٨٢ حوالى ٤,٢ % من قيمة الإنتاج السنوى فى حين أن النسبة إنخفضت إلى ٢,٤ % فقط عندما إستخدمت الطرق الحديثة فى الصيانة.

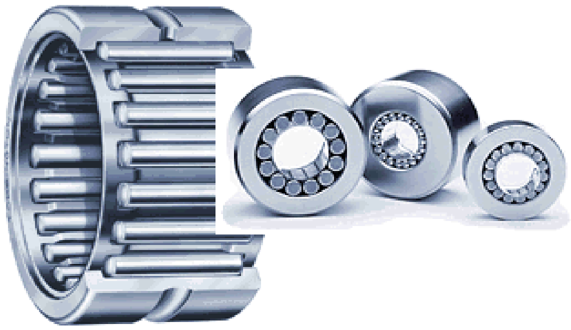
٤– الصيانة الاستباقية "Proactive maintenance"

الصيانة الاستباقية تعرف بأسماء مختلفه مثل صيانة الدقة "precision maintenance" والصيانة القائمة على الموثوقية "reliability based maintenance" وتتمثل فلسفة هذا النوع من الصيانة فى "إصلاح المشكلة مرة واحدة وإصلاحها صح" "fix it once, and fix it right!".

على سبيل المثال إذا نفذنا برنامج الصيانة التنبؤية سوف "نأمل" "hopefully" فى الحصول على تحذير "warning" لإنهيار رولمان البللى ونرتب لإحلاله ونخطط لأعمال الصيانة. ولكن ما السبب الجذرى "root cause" لإنهيار رولمان البللى؟.

إذا تم معرفة السبب وأخذنا الإجراء اللازم لإزالة السبب فإن الماكينة عندما تعود للخدمة تستمر فى العمل لفترة أطول.





نستخدم مصطلح إستباقية "proactive" لأنه بدلاً من الإنتظار حتى تتعطل الماكينة، أخذنا إجراء فى وقت مبكر ليس فقط فى إستبدال أو تغيير رولمان البللى وهو إجراء كان يتبع كما هو الحال فى الصيانة الوقائية ولكن قمنا بتصحيح السبب الجذرى "root cause" لإنهيار رولمان البللى.

ويمكنا معرفة السبب الجذرى "root cause" للعطل بدراسة سجلات "records" مراقبة حالة الماكينة وإجراء بعض الإختبارات مثل إختبارات الرنين "bump tests" وتحليد الطور "phase analysis" ومجموعة من الإختبارات الأخرى وعملية التركيب والإصلاح.

وإعادة النظر فى عمليات الشراء (إختيار الجودة العالية للمعدات وقطع الغيار) ودراسة نوعية الشحومات وطريقة إدارتها.

ونستخدم أيضا مصطلح "الدقة" "precision" لأنه واحداً من أفضل السبل لزيادة العمر الإفتراضى للماكينات وذلك بتطبيق الضبط الدقيق لمحاور المعدات "precision aligning" وعمل الإتزان الدقيق "precision balancing" للمعدات فى الموقع أو بإستخدام ماكينات الإتزان.

ويمكن القول بأنه إذا تم عمل الإتزان الديناميكى الدقيق والضبط الدقيق لمحاور المعدات بالأجهزة الحديثة وبالدقة المطلوبة وحل مشاكل الرنين "resonance" فمن المرجح بأن الماكينة سوف تعمل بنعومة وكفاءة عالية ويطول عمرها بفترة أكبر بكثير قبل الإنهيار.

وبالرغم من إستخدام تقنيات مراقبة حالة الماكينات وإستخدام التكنولوجيات الأخرى لتحليل ومعرفة السبب الجذرى "root cause" للمشكلة وذلك لزيادة موثوقية "reliability" المعدات فى المصنع فإن نظام مراقبة حالة المعدات "condition monitoring" من الممكن أن يقدم أقل من التوقعات المنتظرة منه.

وذلك لأن النظام له العديد من المزايا والكثير من العقبات "hurdles" لحاجة فريق العمل للتدريب لزيادة مهارة التحقق "investigation " لمعرفة السبب الجذرى للعطل وزيادة مهارة ممارسة الضبط الدقيق "precision" لكلٍ من المحاور "alignment" والإتزان الديناميكى "balancing".

ولكى يتم تنفيذ النظام وتشغيله بشكل إيجابى فلابد من تغيير شامل فى الفلسفة من أعلى مستوى إلى أقل مستوى ويجب على الجميع التفهم والموافقة على إحتياجات تطبيق هذه الفلسفة وذلك عندما يكون هناك حاجة للتدريب وعندما يكون هناك وقت لعمل التحقق المفصل "investigations detailed" وعندما يكون هناك وقت مطلوب لتنفيذ الضبط الدقيق لكل من المحاور والإتزان للماكينات وعندما تقدم توصيات لشراء أعلى جودة لقطع الغيار "أكثر تكلفة" ... إلخ.

وبالتالى سيتحقق وفورات على المدى القصير وسوف يعود المصنع إلى حالته الأصلية من حيث بدأ.

٤-١ المزايا "Advantages"

١- زيادة عمر المعدات.

٢- زيادة الاعتمادية على المعدات "Reliability".

٣- تقليل الأعطال والأضرار الثانوية.

٤- تقليل زمن التوقفات عن العمل.

٥- تخفيض تكاليف الصيانة بشكل عام.

٤-٢ العيوب "Disadvantages"

١- تكلفة الأجهزة والبرامج والأفراد.

٢- مطلوب زيادة مهارات "skills" إضافية.

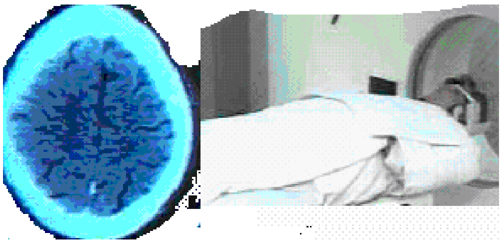
٣- تتطلب تغييراً في الفلسفة بدءاً من الإدارة إلى الأقل.

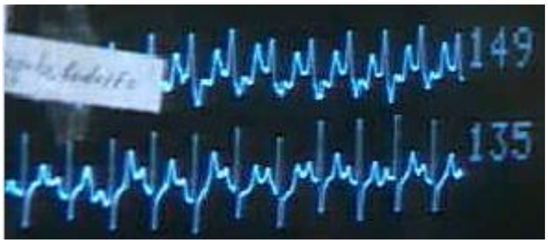
القسم الثالث :– مراقبة حالة المعدات "Condition monitoring"

مقدمه:–

مراقبة الحالة "Condition monitoring" هو فن مراقبة حالة المعدات بحيث نتعرف على صحة أداء المعدات من حيث إستقرارها أو تدهورها بدون الخلط بين ذلك والصيانة التنبؤية.

مراقبة حالة المعدات تتعرض لصحة الماكينات ومستوى أدائها وكلاهما مهم جداً ويتم إستخدام هذه المعلومات كجزء من قرار الإنتاج والصيانة.





نحن حقا محظوظون لأن الماكينات الدوارة تعطى كثيراً من العلامات التى تشير إلى تدهور كل من الحالة والأداء. هناك بعض الحالات التى تتحول فيها حالة الماكينة فجأة وفى وقت قصير جداً من الحالة العادية إلى عطل كارثي وبدون تحذير. ولكن فى معظم الحالات تعطى لنا الكثير من علامات التحذير بأن الإنهيار وشيك.

الآلات الدوارة فيها الكثير مما يشبه جسم الإنسان ومعظم إدارات الصيانة تتعامل مع الماكينات بطريقة هى أقرب لتعامل الكثير من الناس مع صحتهم. فمثلاً بعض الناس تعيش حياة صعبة من الشرب والتدخين والعمل الجاد وهذه الأنشطة ليست جيدة لأجسامهم وإنهم يتلقون إشارات من أجسامهم تفيد بوجود خلل ما ولكنهم يهملون هذه الإشارات والجسم يعطى مهلة ولكن تراودهم أمنية بأن العيب قابل للإصلاح وهذا هو أقرب إلى صيانة الانهيار.

ثم هناك بعض الناس الذين على نفس النمط قد لا يعتنون كثيراً بأنفسهم ولكنهم بين الحين والآخر يأخذون بعض الفيتامينات وزيارة منتجع صحى "health farm" ويفعلون ذلك بشكل دورى لمحاولة التعويض عن كل الأخطاء ولكنهم يصبحون مرضى من وقت لآخر ويبدون أسوأ في أغلب الأحيان بعد زيارة المنتجع الصحّي وهذا هو أقرب إلى الصيانة الوقائية.

ثم هناك بعض الناس الذين لايزالون لا يهتمون كثيراً بأنفسهم لكنهم يذهبون بإنتظام إلى الطبيب لقياس ضغط الدم وأخذ عينات من سوائل الجسم "bodily fluids" ويستمع إلى قلوبهم ويحاول الطبيب إكتشاف المشكلة إن وجدت وبعد ذلك يكتب الدواء والتعليمات المطلوبة قبل أن تدهور صحته أو يصبح الشخص مريضاً جداً. ومن الممكن أن يصبح الشخص مريضاً إذا كان يسير ضد تعليمات أو تحذيرات الطبيب وهذا هو أقرب إلى الصيانة التنبؤية.

وأخيراً لدينا تلك الأشخاص الأصحاء الذين يأكلون الأطعمة الصحية ويقومون بعمل الكثير من التمارين الرياضية. ويعرفون ما هو المفيد للجسم ولذلك يحاولون بذل مزيد من الجهد للقيام بما في وسعهم لبقائهم فى صحة جيدة.

وهم لايزالون يزورون طبيبهم لعمل الإختبارات الدورية ليس من أجل الإمساك بفيروس ولكن من أجل البقاء فى صحة جيدة.

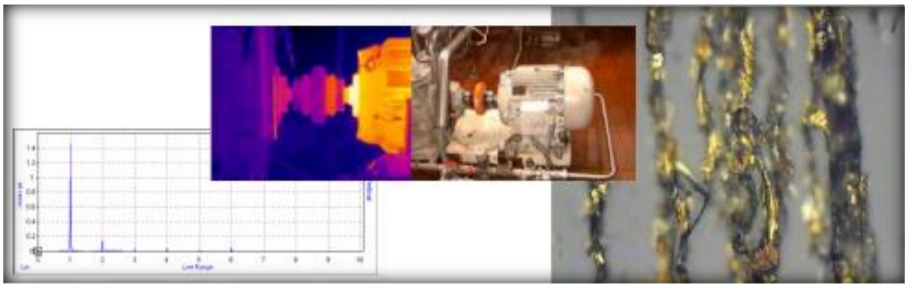
أصحاب العمل يعتبرونهم على درجة موثوقية "reliable" عالية ونادراً مايتغيبون يوماً عن العمل. وهذا هو أقرب إلي الصيانة الإستباقية "proactive" أو صيانة الدقة "precision".

إذا كنت مريضاً وبغض النظر عن كيفية الإعتناء بنفسك فإن دور الطبيب الجيد ليس فى تشخيص المرض فقط أو يساعدك على العودة بصحة جيدة بل العمل على معرفة أسباب المرض. وقد يتطلب ذلك إختبارات إضافية ومراجعة النظام الغذائي الخاص بك وصحتك على مدى الأشهر أو السنوات السابقة. ومع هذه المعرفة والاستعداد لإجراء تغييرات يمكنك التأكد من أنك لا تعاني من هذا المرض مرة أخرى وهذا ما يسمى تحليل الأسباب الجذرية والتى يتوصل فيها الطبيب إلي جذور المشكلة.

١ – المراقبة المتكاملة لحالة المعدات "Integrated condition monitoring"

القياسات والإختبارات ومراقبة حالة المعدات تشبه عملية الذهاب إلى الطبيب حيث يقوم الطبيب بفحص "check" دمائنا والاستماع إلي قلوبنا وفحص ضغط الدم لدينا "blood pressure" والقاء نظرة على حناجرنا.

وفي حالة الآلات الدوارة يمكننا فحص مواد التشحيم وقياس الاهتزازات وقياس التيار الكهربى وإختبار التدفق "flow" وتصريف الضغط "discharge pressure" وقياس درجة الحرارة. من خلال تلك الإختبارات نأمل أن نكون قادرين على بناء صورة واضحة وصحيحة عن صحة المعدات لمعرفة ما يحدث داخل الماكينة.



ولكى نحصل على أفضل صورة لصحة الماكينات يجب ربط نتائج الإختبارات بواسطة بعض البرامج المتكاملة وهذا ما يسمى المراقبة المتكاملة لحالة المعدات وهناك ثلاث نقاط يجب أخذها فى الإعتبار عند تطبيق المراقبة المتكاملة.

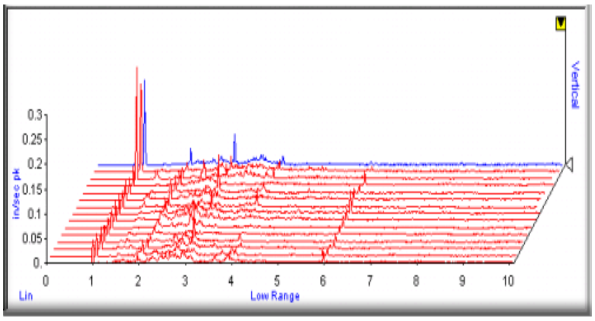
١-١- شروط تطبيق المراقبة المتكاملة

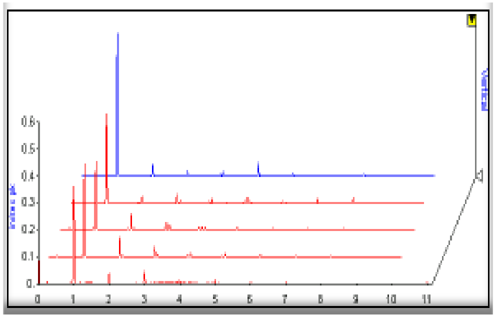
النقطة الأولى: أنه من الممكن لإختبار واحد أن يكون مضللاً أو قد يعطي جزءاً صغيراً من الصورة وفي الحقيقة بعض الإختبارات لا تعطي معلومات حول عيوب معيّنة يمكن أن تواجها الماكينة فمثلا وجود جزيئات معدنية "metal particles" فى مواد التشحيم "lubricant" لاتخبرك بوجود مشكلة عدم الإتزان وكذلك الإهتزازات لا تخبرك بوجود شوائب فى مواد التشحيم.

النقطة الثانية: هي أن بعض الإختبارات المعينة يمكن أن تخبرنا عن الحالات التي يمكن أن تسبب مشاكل للماكينة. على سبيل المثال، الرنين في حد ذاته ليس خطأ حيث أن جميع الماكينات لها رنين. والحقيقة أن الرنين مع سرعة الدوران يمكن أن يؤدى إلى إهتزازات عالية والتى قد تؤدى إلى تلف رولمان البللى وهذه هى المشكلة.

كذلك الملوثات في مواد التشحيم ليست مشكلة. والحقيقة أن التلوث (وغيرها من مواد التشحيم) يمكن أن يسبب تلف فى رولمان البللى وهذه هى المشكلة.

النقطة الثالثة: هي أنه من الأفضل أن تتحقق من النتائج بمقارنة النتائج السابقة بالنتائج الحالية ومن الأفضل أن يكون يكون لدينا بعض البيانات لاستخدامها كمرجع.





يعرف الأطباء ما هو ضغط الدم الطبيعي للإنسان وإذا كان لديك ارتفاع فى ضغط الدم سوف نكون مهتمين لمعرفة نتائج إختبارات الضغط خلال الأشهر القليلة الماضية ومراقبة الضغط عن قرب خلال الأشهر القليلة المقبلة.

ونحن نحاول أن نفعل الشيء نفسه مع الآلات الدوارة حيث نود أن نعرف لها حدود مرجعية لمقارنة نتائج الاختبارات الحالية بالإختبارات السابقة ولكن للأسف المراجع التي لدينا ليست مثل مهنة الطب ولكنها ليست سيئة.

٢- أهمية مراقبة حالة الماكينات الدوارة





قد تسأل لماذا نريد أن نعرف الكثير عن صحة الآلات الدوارة. كلمة واحدة هى الربحية "profitability".

عندما تتعطل الماكينة من الممكن أن يتوقف الإنتاج والتوقف يمكن أن يكون مكلفاً بطريقة لاتصدق لأن خسارة الإنتاج والمنتج الغير مطابق يقلل من أرباح الشركات. عندما تتعطل الماكينة يمكن أن يحدث الضرر الثانوي "secondary damage" وبدلاً من إستبدال رولمان البللى نحتاج ماهو أسوأ وهو تغيير العضو الدوار بالكامل. بالإضافة إلى أن حدوث العطل المفاجئ من الممكن أن يعرض سلامة العمال للخطر. وبذلك يمكن للتكاليف أن تكبر لزيادة وقت الإصلاح وطول فترة التعطل يؤدى إلى إرتفاع تكاليف العمالة.

عندما تتعطل الماكينة يجب أن تكون قطع الغيار في متناول اليد لإكمال الإصلاح. تلك الأجزاء يجب أن تتواجد في المخازن في حالة حدوث عطل. أرصدة وإدارة قطع الغيار مكلفة جداً "very costly". لذلك إذا أمكنا إكتشاف وتقييم مخاطر العطل "risk of failure" أمكننا التخطيط للإصلاح فى الوقت المناسب وتوفير قطع الغيار وتنظيم العمل وهذا لايتحقق إلا من خلال مراقبة مناسبة لحالة المعدات.

إذا كنا نستطيع أيضاً أن نزيد من موثوقية المعدات "reliability" فإن الماكينة فى كثير من الأحيان لاتتعطل.

وإذا أمكنا أن نصل بالماكينة إلى حالتها المصممة عليها (العمر التصميمى) "design life" فسيكون ذلك أكبر عائد على الإستثمار. وسيقلل من تكاليف الصيانة إلى أقل حد. وبالتالى تتزايد أرباح الشركة "company profits". يمكننا تحقيق هذا الهدف "goal" من خلال الضبط الدقيق "precision" لكل من الإتزان الديناميكى "balancing" وضبط المحاور "alignment" ومن خلال أنشطة أخرى مثل (قياس الاهتزازات وتحليلها - تحليل الزيوت - الأشعة تحت الحمراء - الأشعة فوق الصوتية - الفحص البصري).

٣- تكنولوجيا مراقبة حالة المعدات

يتم مراقبة المعدات مراقبة دورية "Periodic monitoring" ويطلق عليها "Off line" ويستخدم فيها الأجهزة المحمولة لقياس الإهتزازات وكذلك استخدام برامج الحاسب الآلى لتحليل وتشخيص الإهتزازات. وهناك نوع آخر من المراقبة وهى المراقبة الدائمة "Continuous monitoring" وتتم للمعدات ذات الأهمية ويطلق عليها "On line" ويستخدم فيها وحدة الإستشعار "Sensor" والمتصلة بالحاسب الآلى.

ولتكامل النظام وزيادة موثوقية المعدات فإننا نستخدام البارامترات الأخرى والمساعده مثل (قياس الحرارة - الكاميرا الحرارية - تحليل الزيوت .. إلخ) وكذلك ضبط محاور المعدات بإستخدام أجهزة حديثة

محمولة تعمل بشعاع الليزر وعمل الإتزان الديناميكى للمعدات الدوارة بموقع المعدة أو على ماكينات الإتزان.

وإستخدام الفحص البصرى "Inspection" وتسجيل الملاحظات للتأكد من عدم وجود سبب آخر للإهتزازات مثل:–

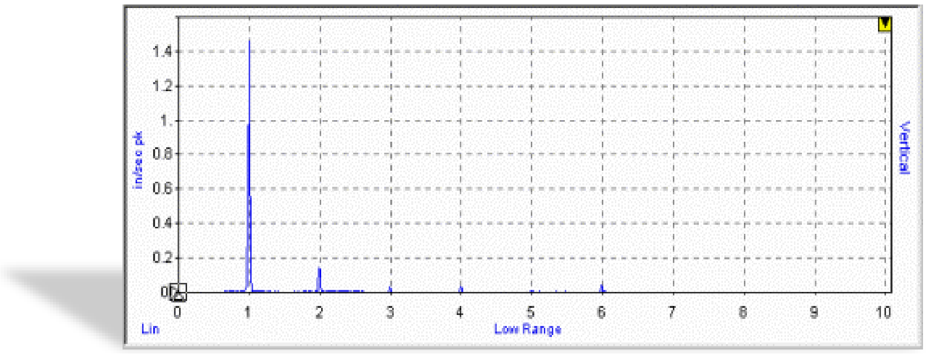
– المسامير المفكوكة "Loose bolts".
– تكسر أو تصدع اللحام "Cracked weldments".
– تحول الأسمنت المحقون "Grouting" الى بودرة.
– تراكم الأتربة على ريش المراوح "Ash accumulation".
– وجود رفه ظاهرية فى المراوح أو الأعضاء الدوارة "Run out".
– تفكك فى أغطية أجزاء الماكينات "محركات – مراوح – درافيل .. إلخ".

والآتى أمثلة لبعض تكنولوجيا مراقبة المعدات:–

٣–١– تحليل الاهتزازات "vibration analysis"

الإهتزازات موجودة فى جميع الآلات الدوارة مثل المضخات والمراوح والتوربينات والضواغط ومستوى الاهتزاز وشكل بصمة الإهتزازات تبين الحالة الداخلية للأجزاء الدوارة.

إذا إستخدمنا الأجهزة الإلكترونية لقياس الإهتزازات يمكننا مراقبة مستوى الإهتزازات وتحليل بصمة الإهتزازات. وإذا زاد مستوى الإهتزازات وتغير شكل البصمة "patterns change" لا يمكننا فقط إكتشاف المشكلة "detect the problem" ولكن يمكننا تشخيص نوع المشكلة " diagnose type of problem".



هناك عدد من أنواع المشاكل المختلفة التى يمكن إكتشافها وشكل بصمة الإهتزاز تساعدنا فى تشخيص وتحليل الإهتزازات ومعرفة مشاكل المعدات مثل مشاكل كل من رولمان البللى وكراسى التحميل (سبائك أو جلب) والتفكك "looseness" والسوفت فووت "الأرجل المعلقة" "soft foot" والمشاكل الكهربية "electrical faults" وتآكل السيور "belt wear" ولا مركزية العضو المتحرك

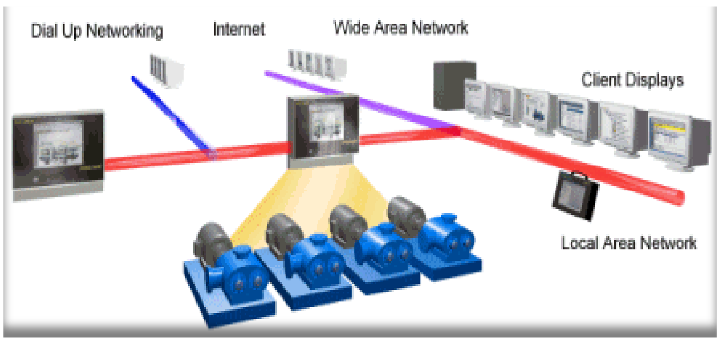
"eccentric rotors" ومشاكل نقل الحركة كالكبالنج والسيور "belt and coupling" وتعشيق التروس "gear mesh" وكسر بارات الروتور للموتور "broken rotor bars" وأكثر من ذلك.

يتضمّن الإجراء الأساسي لقياس الإهتزازات تثبيت مجس (لاقط قياس الإهتزازات) "accelerometer" على رولمان البللى أو داخل رولمان البللى فى حالة إستخدام مجس من نوع آخر يسمى "non-contact eddy current probe" وقياس الإهتزازات بأجهزة إلكترونية محمولة لجمع البيانات تسمى "data collector".



ويتم القياس مرة أو مرتين فى الشهر (من الممكن أن تقل عن ذلك تبعاً لأهمية الماكينة) ويحمل جهاز جامع البيانات "data collector" من ماكينة إلى أخرى ويوضع المجس على رولمان البللى ويتم جمع لقطة "snapshot" من الإهتزاز. ويمكن للمستخدم رؤية قياسات الإهتزازت أثناء القياس على الماكينة وعادةً يؤخذ جهاز جامع البيانات إلى المكتب بعد القياس لنقل البيانات إلى الكمبيوتر حيث يمكن تحليلها من قبل مجموعة من البرامج الخاصة بالإهتزازات "software package".

إذا كانت المعدات حرجة "critical" (بالغة الأهمية) أو كانت فى بيئة نائية أو خطرة "hazardous environment" حيث لايمكن قياسها روتينياً وبالتالى يتم تثبيت مجسات دائمة "mounted permanently" على المعدات يتم توصيلها بنظام مراقبة دائمة لمراقبة مستوى الإهتزازات لإعطاء تحذير مبكر فى حالة وجود عطل.



وأنظمة الحماية "Protection systems" تقوم بمراقبة مستوى الإهتزازات خلال ٢٤ ساعة يومياً مع القدرة على إيقاف الماكينة (أو على الأقل إعطاء تحذير صوتى) أو إعطاء تحذير مبكر فى حالة وجود عطل. هذا النظام ليس جزء من برنامج مراقبة حالة الماكينات "condition monitoring" – ولكنه مطلوب فى كثير من الأحيان لأسباب قانونية بسبب مخاوف تتعلق بالأمن والسلامة.

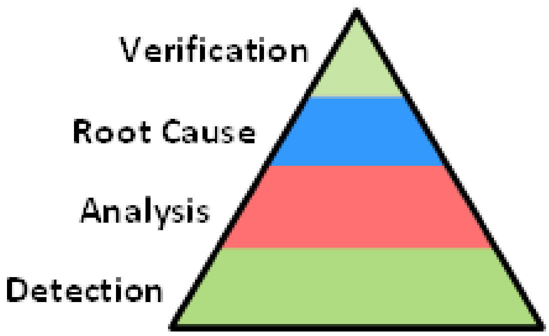
٣-٢- مراحل إكتشاف وحل مشاكل المعدات (أربع مراحل)

١- إكتشاف المشكلة "detection".

٢- تحليل "analysis" المشكلة لمعرفة مدى الخطورة "severity".

٣- تحليل السبب الجذري للمشكلة "root cause".

٤- التحقق "verification" من الإصلاح.



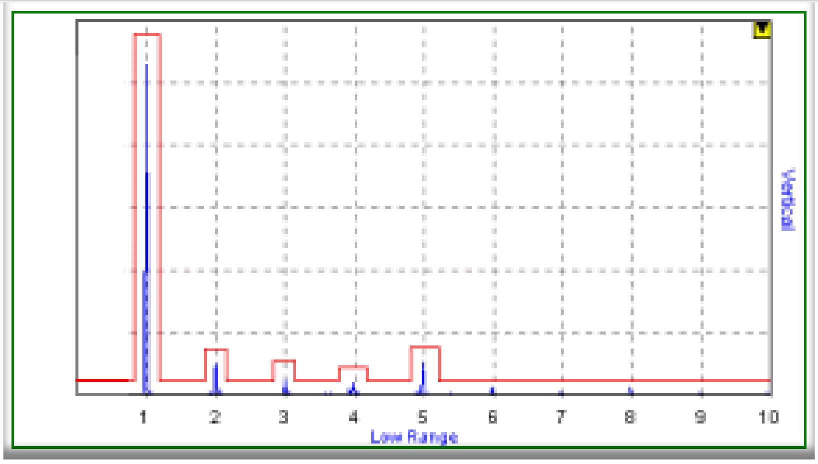
إكتشاف العطل مختلف عن تحليله وهناك فرق كبير بين إكتشاف المشكلة وتحليل أسبابها وذلك لمنع تكرارها. فمثلاً تغيير رولمان البللى المتآكل والذى يظهر بوضوح فى تحليل الإهتزازات ربما لا يحل المشكلة ولكن يجب البحث عن الأسباب التى تؤدى إلى إنهياره وتتمثل فى (عدم المحورية – التفكك – عدم الإتزان ... إلخ).

وإذا لم يتم معرفة أسباب المشكلة فإننا فى هذه الحالة لا نطبق برنامج رصد حالة الماكينات "Condition monitoring program" بل إننا نطبق برنامج آخر وهو برنامج تغيير رولمان البللى "Bearing exchange program".

٣-٢-١- إكتشاف المشكلة "detection"

إن المهمة الأولى لمجموعة البرامج الخاصة بالإهتزازات "software package" هى إكتشاف "detection" مشاكل الماكينات حيث يقوم البرنامج بمقارنة مستويات الإهتزاز الحالية بمجموعة من مستويات الإنذار "alarm limits" والمحسوبة مسبقاً لتلك الماكينة حيث أن البرنامج يقوم اتوماتيكياً بعمل أنماط ومستويات تحذير مختلفة عند بدء تطور حالة المعدة حتى فى الحالات المبكرة منها.

و أيضاً من خلال دراسة بعض التقارير الإستثنائية "exception report" المزود بها برنامج الصيانة التنبؤية لمعرفة الماكينات التى بها مشاكل.



٣-٢-٢- تحليل "analysis" المشكلة

ثم تبدأ مرحلة التحليل "analysis" من خلال مقارنة قيم المستوى العام للإهتزازات التى تم أخذها حالياً مع القراءات السابقة لمعرفة ما إذا كان هناك مشكلة ومدى شدتها "severity" وكذلك دراسة وتحليل كل من بصمة الإهتزازات "spectrum" والمنحنى الموجى "time waveform" ومنحنى الإطراد "Trend Plot". وعمل تقرير مفصل بحالة الماكينة لإدارة الصيانة لإجراء الصيانة اللازمة تبعاً للتوصيات الموصى بها.

٣-٢-٣- تحليل السبب الجذرى "root cause" للمشكلة

بإستخدام نفس مجموعة الأدوات المستخدمة فى تحليل الإهتزازات لتحليل ومعرفة السبب الجذرى للمشكلة ولماذا تطورت المشكلة.

وكتابة توصيات جديدة إضافية مع التوصيات السابقة لإجراء التغييرات اللازمة لتجنب حدوث المشكلة مرة أخرى.

٣-٢-٤- التحقق "verification" من الإصلاح

وأخيراً بعد صيانة الماكينة من قبل مجموعة الصيانة نقوم بأخذ قياسات إضافية للتأكد من أن المشكلة تم حلها حقاً وأن الإصلاح سليم وأن الماكينة أصبحت صالحة للعمل والتشغيل المستمر.

٣-٣- تحليل الزيوت "Oil analysis"

من خلال الإستخدام المنتظم لعملية تحليل الزيوت يمكنك الحصول على تشخيص شامل لحالة المعدة.



ويحتوى التحليل على كثير من المعلومات على سبيل المثال محتوى الماء/ سائل التبريد، اللزوجة، الأوساخ وكمية الجزيئات المعدنية.

ومن خلال التحذيرات المبكرة لعملية تحليل الزيت واكتشاف المشكلات وتشخيصها وحلها على نحو أسرع وبذلك يمكننا التخطيط لعمليات تغيير المكونات في الوقت الملائم قبل حدوث المشاكل ونتجنب التلف البالغ والوقت المهدر بسبب العطل وتقليل أوقات الإصلاح.

وإليك بعض الحقائق الآتية:-

الآلات الدوارة "Rotating machinery" تحتاج إلي التشحيم الصحيح "correct lubrication" ولكن قد تفاجأ فى كثير من الأحيان بإستخدام مواد تشحيم غير صحيحة "incorrect lubricant" أو مواد تشحيم ملوثة "contaminated" والنتيجة هي زيادة تآكل المعدات وإنهيارها.

هناك أيضاً قضية اقتصادية وهى أن مواد التشحيم مكلفة سواءً للشراء أوالتخزين وفي كثير من الأحيان يتم تغيير زيوت تشحيم بحالة جيدة جداً وبتكاليف باهظة.

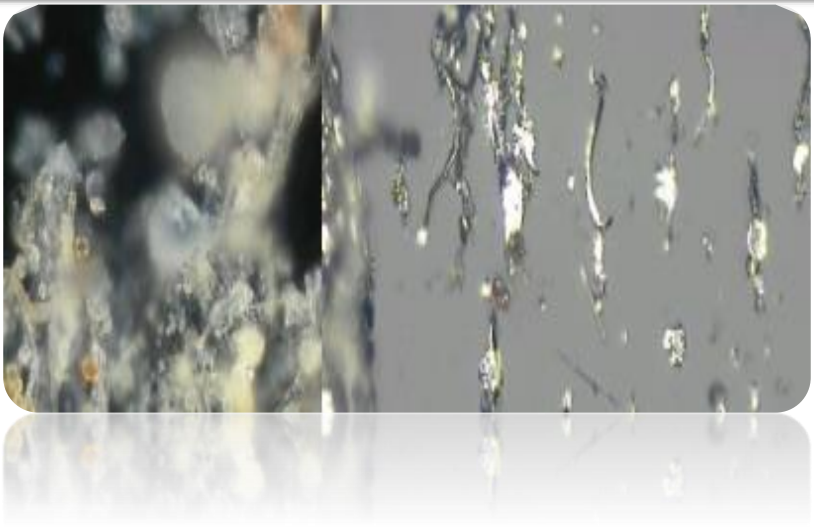
ويتم إجراء إختبارات على الزيوت "oil" والشحومات "grease". ويمكن للإختبار أن يخبرك بأن مواد التشحيم مازالت قادرة على أداء وظيفتها وما إذا كان هناك ملوثات أو معادن "metals" أو عناصر "elements" أخرى أم لا والتى قد تعطى إنذاراً مبكراً للتآكل.

وإحذر من أن معظم تحاليل الزيت لا تستطيع إكتشاف جزيئات التآكل "wear particles" الفعلية حيث أن جهاز الإسبيكتروميتر "spectrometers" محدود حيث يقتصر إكتشافة على الجزيئات التى حجمها أقل من ١٠ ميكرون ونرى بأنك تحتاج لأداء إختبارات معيّنة لإكتشاف جزيئات التآكل.

العديد من الشركات التي تبيع مواد التشحيم توفر بدون مقابل خدمات الإختبارات " testing services" في حين أن قيمة الخدمة تعتبر محدوده وهناك قصص لا تحصى من إنهيار الآلات بينما نتائج إختبارات عينات الزيت المستخدم لا تزال تأتى نظيفة.

٣-٣-١- تحليل الجزيئات المتآكلة "Wear particle"

تقنية قوية "Powerful technique" غير تدخلية "non-intrusive" لفحص الأجزاء المبللة "oil-wetted" من الزيت للماكينة ويكتشف الجزيئات "Particles" من ١ ميكرون إلى ٣٥٠ ميكرون والتحليل يعتمد على شكل الجزيئات "particle shape" وتكوينها "composition" وتوزيع الحجم "size distribution" والتركيز"concentration". إنه يوفر نظرة ثاقبة دقيقة لحالة مكونات تزييت المعدات عن طريق فحص الجزيئات العالقة في مواد التشحيم.



وجمع عينات مواد التشحيم بشكل منتظم تمكنا من تحديد حالة التآكل الغير طبيعى في مرحلة مبكرة. وتحليل جزيئات التآكل يساعد فى تحليل الإهتزازات وفى بعض الحالات يتم الإكتشاف المبكر للعطل عن طريق تحليل جزيئات تآكل المعدات التى تدور ببطء أو الترددية.

على الرغم من أنه من الممكن شراء معدات المختبرات وإجراء الإختبارات في المصنع، ولكن معظم الصناعات تعتمد على المختبرات التجارية الخارجية للإختبارات الخاصة بها. ويجب أن تجمع عينات الزيت في الموقع بطريقة صحيحة ومنتظمة ويتم إرسالها خارج الموقع إلى المختبر ونتائج الاختبار عادةً ما تكون متاحة إلكترونياً وتكون قابلة لدمجها بنظام مراقبة الحالة "condition monitoring system".

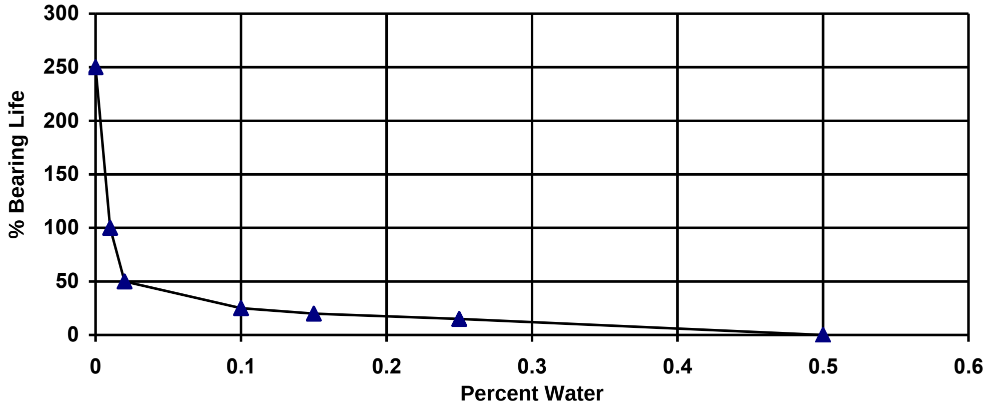
٣-٣-٢- تأثير الزيت الملوث بالماء على عمر رولمان البللى

وفيما يلى مثال يوضح التأثير الهائل لنسب الماء الضئيلة فى الزيت على عمر رولمان البللى (دراسة نشرت بواسطة شركة تمكن Timken لصناعة رولمان البللى) أنظر الشكل البيانى التالى.

حيث أظهرت الدراسة أن نسبة ٠,٥% ماء فى الزيت تخفض عمر رولمان البللى إلى حوالى ٥% فقط فى حين أن إستخدام الزيت النظيف تماماً يطيل عمر رولمان البللى إلى عشرات المرات قدر عمره الإفتراضى وأيضاً الملوثات الصلبة للزيت (الأتربة والشوائب والرايش) لها تأثير ضار جداً على المعدات.

Water and Bearing Life Based on 100% Life at 0.01% Water

تأثير الزيت الملوث بالماء على عمر رولمان البللى



٣-٣-٣- فوائد تطبيق برنامج للتزييت والتشحيم

١- قبول الزيوت النظيفة فقط من شركات موردى الزيوت.

والهدف من ذلك منع وصول زيوت ملوثة أو غير مناسبة إلى المعدات، الأمر الذى يؤدى إلى منع إنهيارات مكلفة جداً بالمعدات الإنتاجية والهيدروليكية والنقل.

٢- إطالة عمر إستخدام الزيوت فى المعدات وذلك عن طريق مراقبة حالة الزيت وتغييره فقط عندما يلزم الأمر (أى عندما يصبح الزيت غير صالح للتزييت) بدلاً من التغيير على فترات محددة.

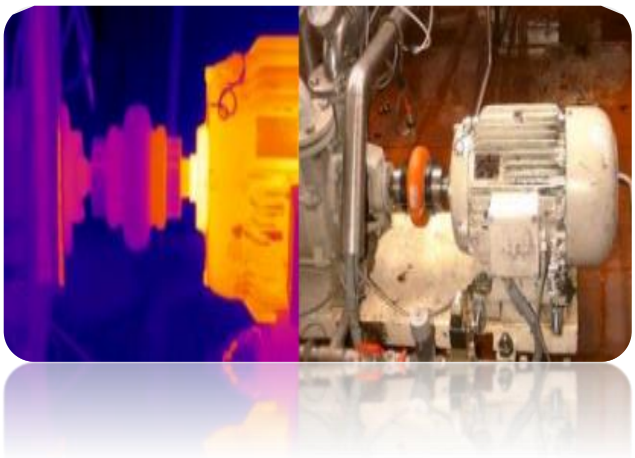
٣- إطالة عمر المعدات الصناعية ويتم ذلك عن طريق منع التآكل فى المعدات بواسطة الملوثات (الصلبة والسائلة) وتدهور الحالة الكيميائية للزيت وبالتالى نضمن إطالة عمر المعدات بنسبة هائلة وتخفيض إستهلاك قطع الغيار إلى أقل حد ممكن.

٤- التصوير الحرارى بإستخدام الأشعة تحت الحمراء "Infrared thermography"

لقد أصبح التصوير الحراري أحد أهم أدوات التشخيص الخاصة بالصيانة التنبوئية. إذ يتيح التصوير الحراري إكتشاف الحالات الغير طبيعية التي غالباً ما لا تُرى بالعين المجردة واتخاذ الإجراءات التصحيحية قبل وقوع حالات تعطل الأنظمة التي تتسبب في تكاليف باهظة. وقد أصبحت كاميرات التصوير بالأشعة تحت الحمراء أنظمة صغيرة الحجم، مثل كاميرا الفيديو/الكاميرا الرقمية العادية، تتسم بسهولة استخدامها وإنتاجها لصورة فورية فائقة الدقة.

التصوير الحرارى إحدى التكنولوجيات الشائعة والمستخدمة فى برامج الصيانة التنبؤية على المعدات الدوارة والمعدات الأخرى فى المصنع لأنها تشتمل على دراسة درجة الحرارة، عند زيادة التآكل وتسرب البخار وحدوث الأقواس الكهربائية.





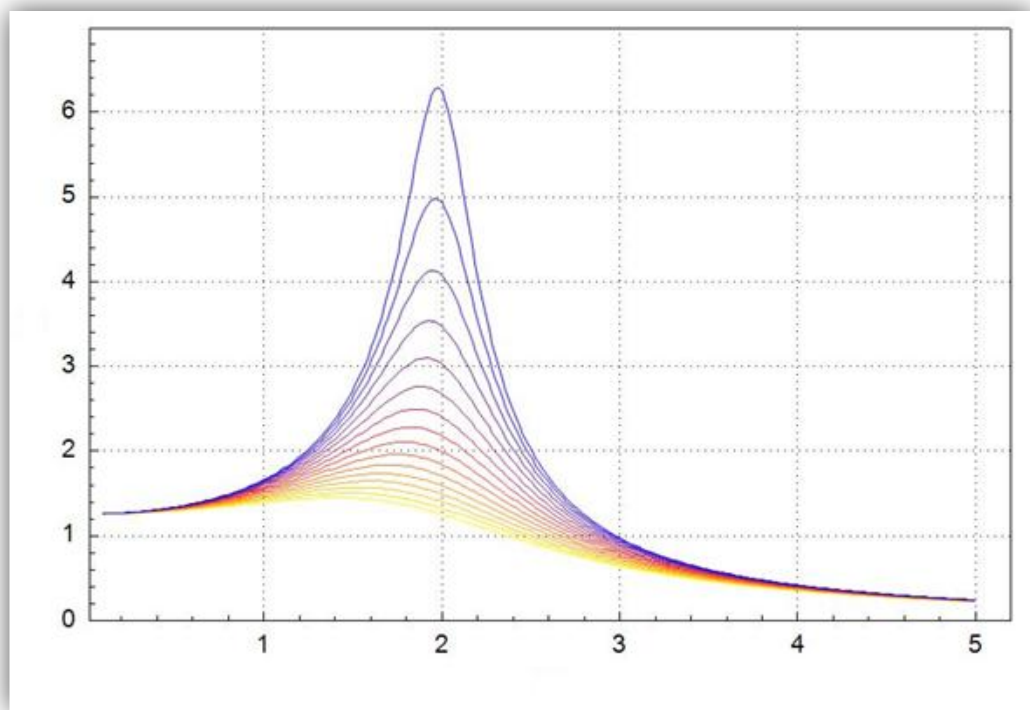
فمن الممكن أن يكون الإختباربسيط بإستخدام مسدس الأشعة تحت الحمراء الذى يستخدم لإختبار درجة الحرارة عند نقطة (على رولمان البللى على سبيل المثال). وتستخدم كاميرات الأشعة تحت الحمراء بواسطة فريق مراقبة الحالة "condition monitoring team" لالتقاط الصور التي تظهر درجة حرارة أى جسم. وتقارن صورة الأشعة تحت الحمراء والصورة الفوتوغرافية لتحديد مكان وجود البقع الساخنة "hot spot" وكذلك المقارنة بين درجة الحرارة العادية "normal" للجسم ودرجة الحرارة الساخنة "hot" تشير إلى حدة المشكلة "severity".

- النهاية -

الباب الثانى

إستجابة النظام الميكانيكى

System response



أقسام الباب الثانى

١- القسم الأول : النظام الميكانيكى

٢- القسم الثانى : الرنين

مقدمه:-

مجال تحليل الإهتزازات يتعامل مع سلوك الأنظمة المهتزة "Vibrating systems" وهذه الأنظمة مثل التربينة البخارية "steam turbine" ومولد التيار المتردد "AC generator" والموتور الكهربى "electric motor" والمضخة "pump" والمروحة "fan" ... إلخ.

وللتعرف على سلوك أى نظام عندما يهتز فإننا بحاجة إلى أن نناقش بعض القواعد "rules" التي تصف كيفية إستجابة النظام لقوى الإهتزاز "Vibratory force".

القسم الأول :- النظام الميكانيكى "mechanical system"

١- النظام الميكانيكى

أى نظام ميكانيكى يتكون من ثلاث كميات "Components" هى (الكتلة "Mass" - الياى (الزنبرك) "Spring" - المخمد "Damping").

١-١- الكتلة (M) "Mass"

فى الفيزياء تعرف الكتلة على أنها مقاومة الجسم للعجلة والكتلة تشغل حجم معين فى ثلاث أبعاد من الفراغ بغض النظر عن شكل ونوع مادة الكتلة.

وهناك فرق بين الكتلة (M) والوزن (W) "Weight" فالكتلة هى مقدار ما يحتويه الجسم من مادة والوزن هو قوة جذب الأرض للجسم. ومن المعروف أن جميع الكتل لها وزن ووزن كتلة الجسم هى محصلة الجاذبية الأرضية.

أى ($W = m g$) حيث أن g هى عجلة الجاذبية الأرضية = ٩.٨١ [متر/ثانية/ثانية].

والوزن عبارة عن قوة "Force" تنتج عندما يحدث تعجيل "Acceleration" للكتلة.

وعلى الأرض الكرة التى وزنها ٧ كيلو جرام يكون وزنها ٧ كيلو جرام بسبب قوة الجاذبية الأرضية "Force of gravity" على كل ذره من ذرات الكرة.

وعلى القمر حيث قوة الجاذبية (سدس) الجاذبية الأرضية وبالتالى يكون وزن الكرة على القمر ١.١٦ كيلو جرام فقط.

وفى الفضاء الأقصى حيث تنعدم الجاذبية لا يكون للكرة أى وزن ولكن كتلة الكرة لا تتغير لأنها تشغل نفس الحيز فى ثلاث إتجاهات فى أى مكان وتعبر الكتلة عن الجسم نفسه فقط.

أما الوزن هو الذى يتغير بسبب التغير فى قوة الجاذبية الأرضية. ومن خلال تعريف النظام فإن الكتلة تنسب إلى أى جزء أو جسم فى نظام حر الحركة أو أى نظام يتحرك بتأثير قوة محركه تؤثر فى سلوكه.

فمثلاً تربينة البخار "steam turbine" بها كتل كثيرة مثل العضو الدوار "Rotor" والريش "Blades" ومبيت أو غلاف التربينة "Housing" ... إلخ.
وغلاف التربينة "Housing" ثابت فى مكانه لا يتحرك ولكن العمود "Shaft" حر الحركة ويتحرك بواسطة قوة البخار "Steam" التى تصطدم بريشة التربينة وبالتالى تتحرك الريشة مع العضو الدوار كأنهم كتلة واحدة.
ومع أن رولمان البللى حر الحركة ولكنه يعتبر كتله منفصله عن كل من العمود والريش. وكما سنرى فيما بعد أن الإهتزازات فى البللى تنتقل إلى العمود ، وبالمثل أيضاً إهتزازات العمود تنتقل كذلك إلى البللى وتحليل هذه الإهتزازات سوف يتعامل مع البللى والعمود وكأنهم كتل منفصله عن بعضها البعض.

١-٢- الياى (الزنبرك) "Spring"

ياى النظام هو أى جزء للنظام مرتكز عليه كتله وسلوكه مماثل للياى.
والياى عبارة عن ملف من الصلب "Coiled Steel" يمكن أن يدفع "Pushes" أو يسحب "Pulls" ضد القوة المؤثرة "Against a force".
وشدة الدفع أو السحب للياى تسمى ثابت الياى ويرمز لها رياضياً (K). ويعرف هذا الثابت بأنه عدد الأرطال "Pounds" الضرورية لكى يتمدد "Extend" الياى بمقدار بوصه واحده. ويحسب ثابت الياى من المعادلة الآتية :-

$$K = \frac{F}{X}$$

حيث أن :-

K = ثابت الياى "Spring constant"

F = القوة "Force"

X = كمية الإزاحة (بوصة) "Amount of displacement"

وعملية سحب الياى إلى الخلف "Backwards" (أى عكس الشد) تسمى قوة إستعادة الياى "Restoring force". وفى حالة تربينة البخار التى تحدثنا عنها سابقاً، ريش التربينة تنثنى "Bends" إنثناءاً طفيفاً "Slightly" عندما يصطدم بها البخار، والعمود "Shaft" يميل بدرجة طفيفه للإلتواء "Twist" والبللى المثبت عليه العمود يتحرك أيضاً.
كل هذه الكتل تكون عبارة عن وحده مكونه من ياى وكتلة "Spring – mass" وذلك لأنها تماثل تماماً ما يحدث فعلاً للنظام الميكانيكى المكون من ياى وكتلة. وثابت الياى "K" لكل ريشة من ريش التربينة تحدد مقدار الإنحناء للريشة عندما يصطدم بها البخار.
وبالمثل ثابت الياى "Spring constant" للعمود يحدد مقدار الإنحناء أو الإنثناء به.

وثابت الياى لأى (ياى - كتلة) فى أى نظام يحدد أو يبين مقدار حركة الكتلة نتيجة تأثير القوة "Response to a force" ونتيجة إلى قوة الإستعادة "Restoring force" والتى تعمل عكس الشد وتساهم فى ديناميكة الحركة للنظام.

١-٣- التخميد (C) "Damping"

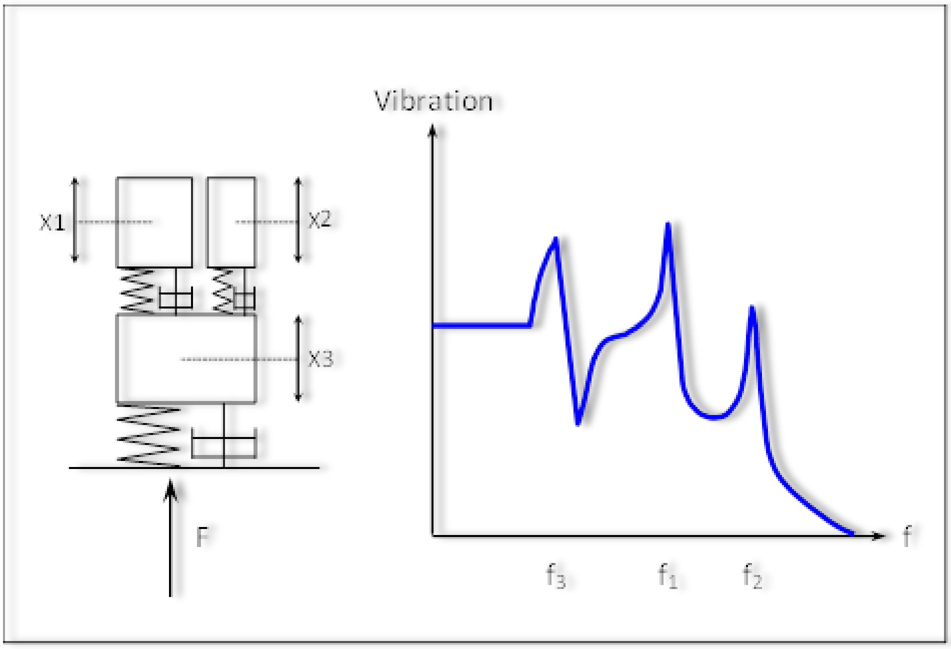
لكى تحدث الحركة "Motion" يجب أن نؤثر بقوة "Force" معينه على الكتلة. والكتلة لا تتحرك إلى الأبد وذلك لوجود ما يقوم بتبديد الطاقة "Dissipates the energy" وتسبب سكون الكتلة. وعملية تبديد الطاقة أو تشتيتها تسمى التخميد "Damping".

٢- درجات الحرية "degree of freedom"

نظام (الياى – الكتلة) "spring-mass" هذا النظام المهتز يسمى نظام الحرية من الدرجة الأولى "single-degree-of-freedom"، والكتلة تتحرك فقط صعوداً وهبوطاً.

ونظام بدرجات حرية متعدد "multiple degrees" له تردد رنين "frequency resonant" عند كل درجة من درجات الحرية.

فالنظام الميكانيكى الذى يتكون من عدد من الكتل والسيايات والمخمدات (متبادلة التأثير) أو يمكنها أن تتحرك فى أكثر من إتجاه يقال على هذا النظام أنه نظام حر مهتز متعدد الدرجات وبصمة التردد سوف تحتوى على "One peak" لكل درجة من النظام الحر وأغلب الأنظمة تكون متعددة الدرجات ومعقدة ومن الصعوبة فصل المركبات الميكانيكية ومن الصعب تصميم نماذج "models" مبسطة لها.



والشكل يبين نظام معرض لقوة خارجية ويتكون من ثلاث كتل وثلاث يايات وثلاث مخمدات.

وسوف يكون لكل واحدة منها بصمة تردد ويلاحظ أنه كلما زادت الكتلة كلما قل التردد الحر بناءاً على المعادلة $F = \sqrt{\frac{k}{m}}$ وبالتالى نلاحظ فى المنحنى أن f3 فى البداية يليها f1 ثم f2 تبعاً لوزن الكتل ويتضح من ذلك أن الماكينة الواحدة لها أكثر من تردد طبيعى f0 فمثلاً يوجد ترددات طبيعية متعددة للعمود ويزداد عدد تلك الترددات عند تركيبه على رولمان بللى.

والقوة الخارجية يمكن أن تثير أى جزء فى الماكينة وإذا إستجاب الجسم لتلك القوة وظهرت إهتزازات بسعات عالية فمعنى ذلك أننا إقتربنا من التردد الطبيعى للجسم لأن الجسم لا يظهر شخصيته إلا فى السعة والسعة فى حد ذاتها ليس لها أهمية ولكنها تعبر فقط عن شخصية الجسم.

إذا رسمنا السعة "amplitude" مقابل التردد "frequency" سوف يكون هناك قمة للرنين " one resonant peak" عند كل درجة من الحرية.

وعموماً نحن معنيين فقط فى الصناعة بإنخفاض درجات الحرية "lower degrees of freedom" (على سبيل المثال الأول إلى الثالث) وهذه الدرجات المنخفضة من الحرية عادة ما تكون قريبة فى التردد "frequency" لدوال القوى "Forcing function" الموجودة فى تشغيل الآلات.

وهناك نوعان من الحركه وهما:-

٢-١ الحركة الدورانية "Rotation"

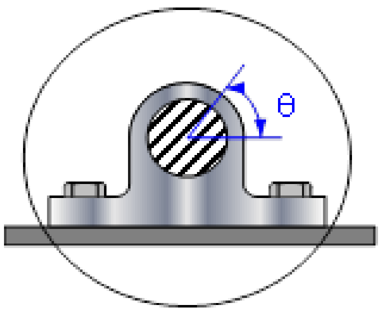
وهى لف الجسم ودورانه حول محوره المركزى "central axis" مثل عجل العربات ومراوح التهويه وغيرها.

وفى الشكل العضو الدوار "Rotor" مثبت على بللى وهو مثال آخر لنظام له درجه حريه واحده.

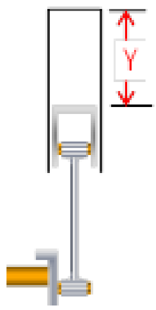
بفرض أن البللى صلب "Rigid" وثابت لا يتحرك، فيتم تحديد موضع العمود بالزاوية المحصورة "θ" بين نقطة ثابتة على العمود "Reference" ومستوى خارجى ثابت " External reference plane" والجسم الصلب "Rigid body" الذى يتحرك بحريه فى الفراغ له ٦ درجات للحرية ثلاثة منها إنتقالية "Translations" والثلاثة الأخرى دورانية "Rotations".

وعند تحليل الإهتزازات نركز أساساً على النظام الذى له درجة حرية واحده.

ولجميع الأنظمة التى لها أكثر من درجة حريه نلاحظ أن حدوث الإهتزازات الواضحه تقع فى منطقة أول درجة حريه "First degree of freedom".



٢-٢- الحركه الإنتقاليه الخطية "Translation"



النظام الميكانيكى "Mechanical systems" مصمم ليتحرك بطريقة معينة ولا يمكنه التحرك بطرق أخرى فمثلاً المكبس "Piston" فى الإسطوانة "Cylinder" مصمم لكى يتحرك إلى أعلى وإلى أسفل فقط. موضع المكبس يمكن تحديده بواسطة موضعه على محور (Y) (وذلك عن طريق بعده عن نهاية الإسطوانة). وهذا المكبس لا يستطيع أن يتحرك فى إتجاه محور (X) (من الجنب إلى الجنب) أو فى إتجاه محور (Z) (للخلف وصاعداً) وليس حراً لكى يدور والمسافه من نهاية الإسطوانة هى التى تحدد موضع المكبس.

ولهذا فإن هذا النظام له درجة حريه واحده "One degree of freedom system".

مثال:- حركة السفينة في البحر لها ست درجات من درجات الحرية هو " six degree of freedom".

الحركة الإنتقالية "Translation":-

١- تتحرك صعوداً وهبوطاً.

٢- تتحرك يميناً ويساراً.

٣- التحرك إلى الأمام والخلف.

الحركة الدورانية "Rotation":-

١- يميل إلى الأمام والخلف.

٢- الإنحراف إلى اليسار واليمين.

٣- الإمالة (على الأجناب) جنباً إلى جنب.

٣- دالة القوة "Forcing function"

والنظام الميكانيكى لا يهتز من نفسه ولكن لابد أن نؤثر عليه بقوة لكى يهتز وأبسط نظام للإهتزازات هو حركة البندول ولكى نجعل البندول يبدأ فى الحركة يجب أن نؤثر عليه بقوة عن طريق دفعه وهذا ينطبق على كل الأنظمة الميكانيكية حيث أن النظام لكى يهتز يجب أن نؤثر عليه بقوة جيبية "sinusoidal force F(t)" وتسمى بدالة القوة "Forcing function" وكلمة دالة "function" تدل على حدث مستمر يتغير تبعاً لمتغير آخر.

وتوجد عدة مصادر لدوال القوة والتى تحدث الإهتزازات القسرية منها:-

١- القوة المتولدة داخلياً "Internally generated forces".

٢- عدم الإتزان الديناميكى للجزء الدوار.

٣-

٤- عدم إستقامة محور دوران عمود المحرك مع عمود المعدة التى يديرها.

٥- إنحناء العمود.

٦- تفكك مسامير القواعد.

٧- تآكل أو إنهيار وصلة الحركة "Coupling".

٨- تزييت زائد أو تزييت قليل.

٩- ترحيل مركز دوران الجزء الدوار (تروس – روتر – إلخ).

١٠- الأحمال الخارجية أو الزائدة "External loads".

١١- الإثارة الناتجة من البيئة المحيطة "Ambient excitation".

والآن عرفنا نظام له كتلة وياي ومخمد وذكرنا أن هذا النظام أجبرناه "forced" لكى يهتز بواسطة إحدى دوال القوى السابقة والآن دعنا نقوم بمعرفة خواص الإهتزازات.

٤- الأشكال الرئيسية لتخميد الإهتزازات "main forms of damping"

التخميد هو تناقص سعة الإهتزاز "amplitude" للنظام المهتز "oscillating system" بمرور الزمن.

والنظام المهتز يعاني من التخميد فقط عندما يفقد الطاقة الى الوسط المحيط به على شكل حرارة.
ونلاحظ تباطأ تأرجح البندول ثم توقفه لأن مقاومة الهواء تبطئ سرعة الجسم وهذا يعنى فقدان الطاقة من النظام للتغلب على الاحتكاك وهذا ما يسمى تأثير التخميد أو تخامد الإهتزازات.

ويوجد ثلاثة أشكال "Forms" رئيسية للتخميد "Damping":-

٤-١- تخميد الإحتكاك "Friction damping"

تخميد الإحتكاك يحدث عندما ينزلق "Slide" جزئين من النظام عكس بعضهما، فإذا قمت بإنزلاق يدك بسرعه على تربيزه فإن قوة الإحتكاك "Friction force" سوف تبذل جهداً ضد يدك وتمنع يدك من الإنزلاق بسهولة وتبدد بعض الطاقة لحركة يدك. ولأن الطاقة لا تفنى تبعاً لقانون بقاء الطاقة فإن كلا اليد والتربيزة تبقى ساخنة بعض الشيء.

وقوة الإحتكاك "Friction force" بين السطحين عبارة عن حاصل ضرب كميتين هما معامل الإحتكاك "Coefficient of friction" والحمل "Load".

ومعامل الإحتكاك كمية ثابتة ويعبر عن كمية الإحتكاك بين سطحين وهذا الثابت "Constant" يعتمد على الخواص الطبيعية "Physical properties" لكل من السطحين.

ويوجد معامل إحتكاك صغير بين كل من الثلج "Ice" والصلب "Steel"، ومكعب الثلج ينزلق بسهوله كبيرة عبر قضيب مسطح من الصلب، وعلى العكس كتلة من المطاط "Rubber" لا تنزلق بسهوله عبر قضيب مسطح من الصلب وذلك لأن معامل الإحتكاك بين المطاط والصلب يكون عالياً.

وعندما ينزلق سطحين ضد بعضهما تحت تأثير حمل معين فإننا نرى أنه بزيادة الحمل تزداد قوة الإحتكاك "Friction force".

مثلاً يوجد معامل إحتكاك معين فى نظام الفرملة. ولأن هذا المعامل ثابت عند ثبوت الحرارة فإن الحمل فقط هو الذى يسبب تغير فى قوة الإحتكاك بين السطحين .

وإذا لم تستخدم الفرملة فإن قوة الإحتكاك تكون صغيرة بين السطحين وإذا إستخدمت الفرملة فإن الحمل يزيد وبالتالى تزداد قوة الإحتكاك وتتوقف الحركة.

وعندما تتحرك الفرملة تدريجياً فإن قوة الإحتكاك (وبالتالى كمية الطاقة المفقودة بسبب الإحتكاك) تزداد تدريجياً وتكون قوة الإحتكاك صفراً عند إيقاف الفرملة وذلك مع إهمال الحمل.

وقوة الإحتكاك تكون صغيرة فى المصانع وبالتالى تأثير تخميد الإحتكاك على الإهتزازات عادة ما يكون ضئيل جداً.

ورولمان البللى والأسطح المنزلقة تصمم لتقليل الإحتكاك ويستخدم فيها المزيتات "Lubrication" ونتيجة لإستخدام الزيوت والشحوم لتقليل تخميد الإحتكاك ينتج عنها تخميد اللزوجة.

٤-٢- تخميد اللزوجة "Viscous damping"

بعض السوائل كالماء والكحول تكون أقل لزوجة حيث قابليتها للإنسياب أو الحركة كبيرة فى حين أن مقاومتها لحركة الأجسام فيها صغيرة. وبعض السوائل كالعسل والجلسرين تكون أكثر لزوجة حيث قابليتها للإنسياب أو الحركة صغيرة فى حين أن مقاومتها لحركة الأجسام فيها كبيرة.

وتخميد اللزوجة ينتج من قوة المقاومة "resistive force" ضد حركة الأجسام خلال مائع لزج "viscous fluid". وممتص الصدمات "shock absorber" فى السيارات مثال شائع لنظام به تخميد اللزوجة. وكلما زادت سرعة الجسم زادت قوة المقاومة (كمية الطاقة المفقودة فى تحميل اللزوجة).

ولتفسير خاصية اللزوجة نتصور طبقة من السائل محصورة بين لوحين مستويين أحدهما ساكن والآخر يتحرك بسرعة مقدارها "V". والسائل الملامس للوح الساكن يكون ساكناً ويتحرك السائل الملامس للوح المتحرك بنفس سرعته وهى "V" ويتحرك السائل بين اللوحين بسرعات تتراوح من الصفر إلى"V" وفى الإتجاه من اللوح الساكن إلى اللوح المتحرك، كما لو كان السائل يتحرك فى

طبقات حيث تكون سرعة كل طبقة أقل من سرعة الطبقة التى تعلوها ، ويرجع هذا الإختلاف النسبى فى السرعة إلى ما يلى:-

أ- قوى الإحتكاك بين السطح المستوى للوح السفلى وطبقة السائل الملاصقه له. وتعزى هذه القوى إلى التلاصق بين جزيئات سطح المستوى الصلب وجزيئات السائل المجاورة لها مباشرة فتمسك بها وتعوق إنسيابها فتبدو هذه الطبقة ساكنة عديمة الحركة. ولنفس السبب تتحرك الطبقة العليا للسائل بنفس سرعة اللوح العلوى.

ب- قوى شبيهه بقوى الإحتكاك بين كل طبقة من طبقات السائل والطبقة التى تعلوها فتعوق إنزلاق بعضها فوق بعض، مما ينشأ عنه فرق نسبى فى السرعة بين كل طبقة والتى تجاورها.

واللزوجة هى تلك الخاصية التى تتسبب فى وجود مقاومة أو إحتكاك بين طبقات السائل تعوق إنزلاق بعضها فوق بعض.

وتخميد اللزوجة هو المصدر الشائع للتخميد ويوجد له مصدرين وهما:-

أ- تزييت وتشحيم رولمان البللى:-

التزييت داخل رولمان البللى ينتج عنه قوة مقاومة "resistive force" ضد حركة الكرات "Balls" والأعمدة فى الجلب "Sleeves" ولذلك أى إهتزازات تنقل إلى رولمان البللى تخمد أيضاً بواسطة قوة مقاومة المائع "Fluid's resistive force". وإذا كان هذا التخميد كافى فإن إهتزازات قليلة سوف تنتقل إلى الأجزاء الأخرى من النظام.

ب- مقاومة الهواء للأجسام المتحركة:-

عندما تبلغ السيارة سرعتها القصوى فإن الشغل الكلى الذى تبذله الآلة والمستمد من الوقود المستهلك يعمل معظمه ضد مقاومة الهواء للسيارة أثناء حركتها خلاله، وفى السرعات الصغيرة نسبياً أو المتوسطة فإن مقاومة الهواء للأجسام المتحركة فيه والناتجة عن لزوجة الهواء تتناسب طردياً مع سرعة الأجسام المتحركه خلاله، وعندما تزداد سرعة السيارة عن حد معين فإن مقاومة الهواء لا تتناسب مع سرعتها فقط وإنما مع مربع السرعة ويعنى ذلك أن إستهلاك الوقود يزداد معدله مع زيادة السرعة عن هذا الحد المذكور وبالتالى يلجأ قائد السيارة إلى الحد من سرعتها لتوفير إستهلاك الوقود.

ومعظم العمليات فى الصناعه تكون عمليات لزوجة "Viscous processes" مثل ضخ الهواء "Pumping air" وضخ الماء "Pumping sewage" وعمليات التجليخ "Grinding pulp" (الهواء يعتبر مائع لأن سلوكه الديناميكى يكون رياضياً مماثل للموائع).

وكل العمليات السابقة تعتبر عمليات لزوجه لأنها تتعامل مع الموائع ولكون لزوجة الموائع تسهم فى القوة المقاومة "Resistive force" فإن المائع فى عمليات اللزوجه يقوم بعمل تخميد اللزوجه.

٤-٣- تخميد التخلف المغناطيسى "Hysteresis damping"

ويطلق عليه أيضاً التخميد الإنشائى "Structural damping" وهو عباره عن إحتكاك داخلى "Internal friction" يحدث فى المواد الصلبه "Solid materials" خصوصاً المعادن، وهذا النوع من التخميد يحدث نتيجة تزحلق "Slipping" وإنزلاق "Sliding" المستويات الداخلية " Internal planes" عندما تتعرض المادة "Material" للثنى.

عند شد الياى "Spring is stretched" أو عند حدوث إنحناء "Deflected" فى العمود أوالمواد الصلبة "Solid materials" فإن الإجهادات "Stresses" الداخلية تزداد كما لو كانت الجزيئات "Molecules" تتزحلق على بعضها البعض وهذا التزحلق الداخلى ينشأ عنه إحتكاك بين الجزيئات وقوة الإحتكاك "Friction force" تقاوم قوة الثنى "Deflecting force" وتسبب الإخماد.

ولأن هذا الإحتكاك يحدث على مستوى الجزيئات ولذلك فإن تأثيره غير جدير بالملاحظة والإهتمام.

ونلاحظ أن تخميد التخلف المغناطيسى "Hysteresis damping" يكون عالى فى عمليات الصب "Castings" عنه فى عمليات اللحام "Weldments".

٥- جميع الأنظمة تحتوى على التخميد "All systems have damping"

لاحظ أنه لا توجد علامات ناقص فى المعادلات الآتية مع العلم بأننا إفترضنا إهمال مصادر التخميد بالبندول (الإحتكاك في محاور الدوران "pivot" ومقاومة الهواء وإلخ ...). إذا لم يتم طرح أي شيء يخص التخميد ولايوجد أى فقد فى الطاقة وبالتالى سوف يتأرجح البندول إلى الأبد "forever". ونحن نعلم من التجارب أنه لا شئ يتحرك إلى الأبد.

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \qquad \text{(معادلة ١)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l}} \qquad \text{(معادلة ٢)}$$

من أجل جعل هذه المعادلات أكثر إلى الواقع في الحياة، يجب أن تشمل بعض المصطلحات التى تمثل الطاقة المفقودة من التخميد. حيث يمثل التخميد حسابياً بالحرف (c).

يتم تعريف التخميد اللزج "Viscous damping" كقوة/سرعة "force/velocity" ويقاس فى النظام الإنجليزى بالرطل-ثانية لكل بوصة (lb.-sec./in.) وفى النظام المترى بالجرام – ثانية لكل سنتيمتر (gm.-sec./cm.) وبإضافة التخميد تتغيير المعادلة لتصبح كالآتى :-

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \qquad \text{(معادلة ٣)}$$

حيث :-

f_c = إخماد التردد الطبيعى (هرتز) "damped natural frequency".

f_n= التردد الطبيعى (هرتز).

g = عجلة الجاذبية الأرضية (سنتيمتر/ ث٢) "acceleration due to gravity".

l = طول البندول (سنتيمتر) "length of the pendulum".

c = تخميد الإهتزازات (جرام– ثانية/سنتيمتر) "damping".

m = كتلة البندول ($\frac{gm-sec^2}{cm}$) "the mass of the pendulum".

في الأصل، عندما إفترضنا أنه لا يوجد تخميد في البندول، وأهملنا تأثير الكتلة "mass" وكان الشيء الوحيد الذي يحدد تردد البندول "pendulum's frequency" هو الطول "length". الآن، عند حساب تخميد التردد الطبيعي "damped natural frequency" تصبح الكتلة مهمه.

الإشارة السالبة فى المعادلة (٣) السابقة تسمح لنا بالنظر إلى تأثير التخميد على التردد الطبيعى للنظام "natural frequency"

وإذا كانت كمية g/l أكبر من كمية $(c/2m)^2$، يكون الفرق عدد موجب وبالتالى يمكن حساب تخميد التردد الطبيعي "damped natural frequency".

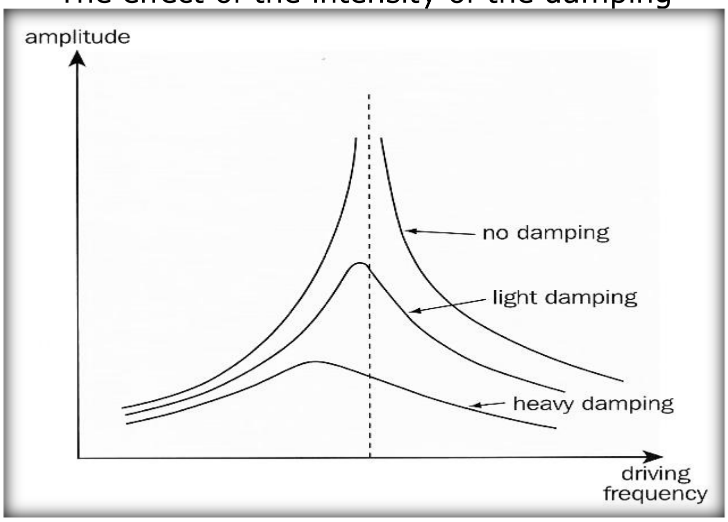
على سبيل المثال :– إذا كانت g/l تساوى 9.8 و $(c/2m)^2$ تساوى 2.25 فيكون 9.8 – 2.25 = 7.55 و الجذر التربيعى للمقدار 7.55 يساوى تقريبا 2.75 وفى النهاية 2.75 * $1/2\pi$= 0.437 هرتز أو سيكل/ثانية.

٦– تأثير شدة التخميد على الرنين
The effect of the intensity of the damping on the resonance

التخامد يمتص الطاقة وهذا يقلل من تأثير الرنين ويستخدم التخامد عندما يسبب الرنين مشكلة. وخير مثال هو تخامد المباني في مناطق الزلزال فالأساسات صممت لإمتصاص الطاقة. وهذا يوقف سعة الإهتزاز للمباني من الوصول إلى مستويات خطيرة عندما يضربها زلزال.

والشكل رقم (١) يظهر تأثير مستويات مختلفة من التخامد على ذروة الرنين. ونلاحظ أنه عندما يزداد التخامد فإن سعة الإهتزاز الرنيني تقل وكذلك تردد الرنين يصبح أقل ويزاح نحو اليسار.

The effect of the intensity of the damping



شكل رقم (١) :– تأثير شدة التخميد على الرنين

ومن خلال مقارنة الكمية g/l بالكمية $(c/2m)^2$ فى المعادلة السابقة يمكن تحديد نوع التخميد الواقع تحت تأثير النظام.

٦-١- التخامد الضئيل "Light damping"

عندما يكون كمية g/l أكبر من كمية $(c/2m)^2$، يكون الفرق دائماً عدد موجب وسيكون الجذر التربيعى لهذا الفرق أكبر من الصفر (0).

الأنظمة التى يكون تخميد تردد الرنين (f_c) "damped resonant frequency" أكبر من الصفر يكون النظام واقع تحت تأثير المخمد "under damped" أو التخامد الضئيل "Light damping". وهذا النظام يكون حر لكى يهتز وعندما يعاق فى حركته فتأخذ الإهتزازات وقتاً أطول لكى تضمحل و تموت (يهتز لعدة دورات قبل أن يخلد إلى السكون). والشكل رقم (٢) يبين العلاقة بين السعة مقابل الزمن لنظام واقع تحت تأثير الإخماد "under damped" أو التخامد الضئيل "Light damping".

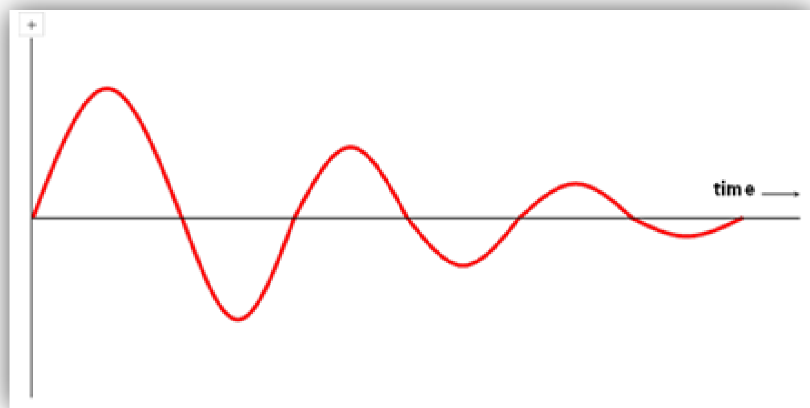


Figure (2):- an under damped system

٦-٢- التخامد الحرج "Critical damping"

إذا كان g/l و $(c/2m)^2$ أقرب إلى بعضهما البعض وبالتالى سيكون الفرق بينهم صغير جداً. وإذا كانت الكميتان متساويتان سيكون الفرق بينهما صفراً (0).

والنظام الذى يكون تخميد تردد الرنين (f_c) "damped resonant frequency" مساوياً الصفر يسمى التخامد الحرج "Critical damping".

وفى نظام التخامد الحرج يتحرك النظام خلال دورة واحدة "one cycle" ولكنه لايهتز. نفترض أن البندول معلق فى حمام السباحة "swimming pool" فإذا كان الحمام فارغاً فإن البندول يكون تحت تأثير الإخماد "under damped" وعند دفعه فإنه سوف يهتز بحرية. وإذا ملأنا الحمام بالماء فإن النظام يكون قريب من التخامد الحرج "critically damped". وإذا دفعنا البندول بنفس الدفعة السابقة فإن البندول سيتحرك قليلاً ثم يتوقف وربما يتحرك خلال دورة واحدة على الأكثر ثم

يتوقف. ولكن السعة الإهتزازية تكون منخفضة. ويأخذ الكثير من الطاقة "energy" للحفاظ على تحرك النظام.

والشكل رقم (٣) يبين العلاقة بين السعة مقابل الزمن لنظام واقع تحت تأثير الإخماد الحرج "Critical damping".

لاحظ أن السعة "amplitude" تبدأ فى الصعود "rise" والهبوط "fall" مثل منحنى الإزاحة الدورية "periodic displacement" لنظام واقع تحت تأثير الإخماد الحرج "Critical damping".

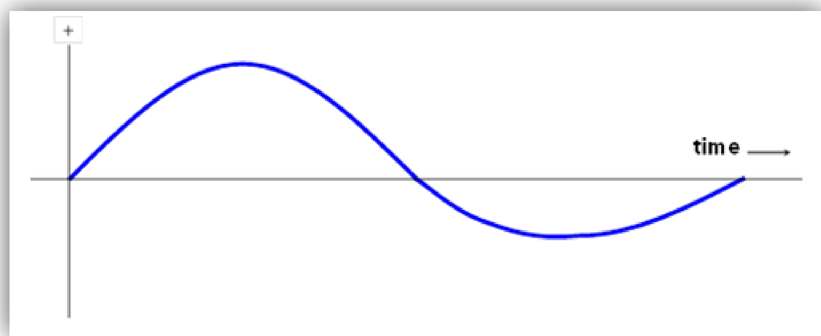


Figure (3):- a critically damped system

٦-٣- التخامد التام "Over damped"

إذا كان g/l أقل من $(c/2m)^2$ النتيجة هى رقم سالب ومربع الجذر التربيعى لعدد سالب هو وهمى "imaginary"، والنظام الذى يكون تخميد تردد الرنين (f_c) "damped resonant frequency" وهمى يكون نطام تخامده شديد أو تخامده تام "Over damped".

والنظام الذى تخامده شديد أو تام قد يتحرك أيضاً ولكن حركته غير متذبذبة "non-oscillatory".

والشكل الآتى يبين العلاقة بين السعة مقابل الزمن لنظام واقع تحت تأثير الإخماد الشديد أو التام "Over damped". لاحظ أن الحركة لا تبدأ فى الإهتزاز وبمجرد إثارة النظام "disturbed" يهبط بسرعة إلى الصفر (0) "drops very quickly".

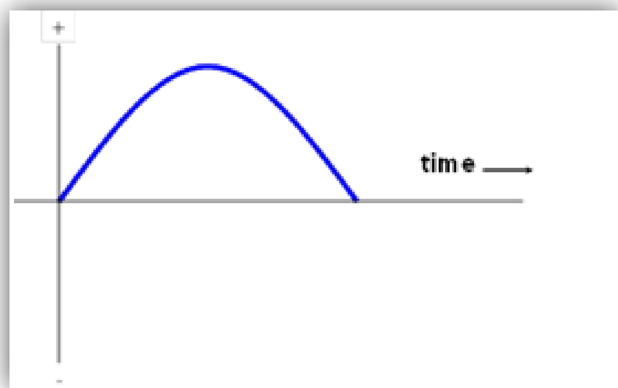


Figure (4):- an over damped system

البندول مثالٌ جيد لنظامٍ واقع تحت تأثير الإخماد "under damped". عند إثارته بقوة أولية " initial force" فإنه سوف يهتز عدة مرات قبل أن يخلد إلى السكون. ومع إستثناءات قليله فإن معظم النظم الميكانيكية فى الصناعة تكون "under damped" أى واقعة تحت تأثير الإخماد. عندما يؤثر عليها بقوة قسرية "forced" فإنها تهتز مع قليل من التخميد "little damping".

بعض الشركات المصنعة تصمم أنظمة التعليق للسيارات (ممتص الصدمات) ويسمى التخامد الحرج "critically damped" وهو التخامد اللازم لإيقاف الإهتزازات بسرعة والتي تقلل من التحكم بالسيارة أو حدوث تلف في بعض أجزائها نتيجة لتلك الإهتزازات.

عندما تصطدم السيارة بأى شئ على الطريق فيهتز ممتص الصدمات "shock absorber" مرةً واحدةً ويخلد إلى السكون مرةً واحده.

وأجهزة القياس الضخمة (الميزان) "huge scales" فى محطات وزن الشاحنات "truck" يكون تخامدها شديد أو تام "Over damped" ليعود المؤشر الى مكانه الصحيح بسرعة عالية بعد إجراء عملية القياس بدون إهتزاز.

٧- معظم الأنظمة لديها كميات صغيرة من التخميد " Most systems have small amounts of damping"

الآن دعنا إستخدام البندول ولكنه فى هذه المرة واقع تحت تأثير الإخماد "under damped" وذلك بتحميله بالياى (spring-loaded). ونلاحظ تناقص سعة الإهتزاز "amplitude" لحركة البندول بمرور الزمن وتباطأ تأرجح البندول ثم توقفه تحت تأثير التخميد أو تخامد الإهتزازات كما هو مبين في الشكل رقم (٥).

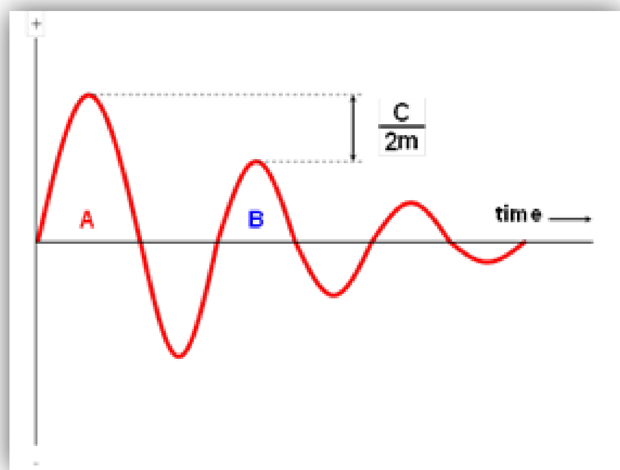


Figure (5) :- plotting a damped pendulum’s movement

لاحظ كيف يسبب التخميد فى تخفيض السعة عند كل دورة لتكون أقل وأقل حتى يلتقى المنحنى فى النهاية عند خط الصفر "0 line" ويتوقف إهتزاز البندول.

وبما أن السعة لكل دورة تقل فإن المساحة تحت المنحنى تقل أيضاً. وتوضع علامة (A) على المساحة تحت الجزء الموجب من أول دورة وتوضع علامة (B) على نفس المساحة فى الدورة الثانية.

إذا أمكنا حساب مساحة (A) و(B) وطرحهما فإن الفرق بينهما يكون مساوياً $c/2m$ وإذا كررنا هذا العمل لكل دورة متبقيه فإن المساحة تحت المنحنى تقل بقيمة c/2m مراراً وتكراراً حتى لا يتبقى أى شئ.

الآن يمكنك أن ترى كيف يشارك المصطلح $c/2m$ في تخميد الإهتزازات "damping vibration".

المساحة (A) هى الطاقة التى دخلت حيز البندول لجعله يتحرك والطاقة (B) هى ما وصل إليه البندول مرة أخرى، وما تبقى من الطاقة قد أمتص بواسطة التخميد. وللحفاظ على البندول يهتز بنفس السعة "amplitude"، يجب أن تعود الطاقة المساوية $c/2m$ للنظام مرة أخرى عند كل دوره.

إذا كانت (c) صغيرةً جداً وبالتالى ستكون قيمة $c/2m$ صغيرة والتخميد سيكون منخفضاً. على الرغم من أن معظم الأنظمة تحتوى [illegible] من التخميد لكنه [illegible]

فى معظم الحالات، يتم تصميم الأنظمة مع قليل أو عدم الإهتمام بالتخميد. والإستثناءات الوحيده لهذه النظم مثل نظام التعليق للسيارة حيث تستخدم لإمتصاص الصدمات لتخفيف الإهتزازات.

ولكن هذه إستثناءات، ويتم تصميم الأنظمة للتحرك بحرية ودون عوائق كلما أمكن ذلك، ومع ذلك لديها كميات صغيرة من التخميد. وهذا هو أحد الإعتبارات الهامه، هو أن كميات صغيرة من التخميد تفعل القليل جداً لتخفيف الإهتزاز غير المرغوب فيها.

نادراً ما يتم تصميم التخميد في النظام والمصدر الرئيسي للتخميد في الصناعة هي مواد التشحيم "lubricants" والعمليات "Processes". وعادةً ما تكون مواد التشحيم هى السائل اللزج الذى يقوم بتخفيف الإهتزازات. والعمليات "Processes" مثل تخميد الهواء أو الماء أيضاً توفر التخميد.

القسم الثانى :- الرنين

١- الإهتزاز الحر والقسري "free and forced vibration"

سوف تسمع في كثير من الأحيان الناس في تدريب الإهتزازات تتحدث عن الإهتزازات الحرة والقسرية. وفي الأنظمة السابقة تحدثنا حتى الآن عن عمل قوة أولية "initial force" لبدء تشغيل النظام لكى يهتز (سحب البندول وتركه، دفع الطفل على الأرجوحه).

بمجرد أن يبدأ النظام فى الإهتزاز وتركه بدون التأثير عليه بأى قوة إضافية. وبالتالى يتوقف النظام فى نهاية المطاف عن الإهتزاز نتيجة تأثير المخمد "result of damping". هذا النوع من الإهتزاز هو الإهتزاز الحر "free vibration" وفيه لم يتم إضافة أي طاقة "no energy" بعد القوة الأولية "initial force" التي جعلت النظام يبدأ فى الإهتزاز.

يتم الإحتفاظ بالإهتزازات القسرية "Forced vibration" من دورة "cycle" إلى أخرى بواسطة دالة القوة "forcing function".

بعض أجزاء العمليات (الموتور، التربينة وإلخ.....) تجبر النظام على أن يهتز ويحافظ على الطاقة بحيث لا تتغير السعة "amplitude" وتبقى ثابتة طوال الوقت.

- الطاقة اللازمة للحفاظ على إهتزاز النظام منخفضة

عندما يهتز النظام عند التردد الطبيعى والطاقة المفقودة "energy loss" نتيجة التخميد صغيرة، فإنه من السهل لهذا النظام أن يهتز. ولذلك عندما يهتز النظام يكون قريب أو عند تردده الطبيعى "natural frequency" والطاقة اللازمة للحفاظ على حركته تكون صغيرةً جداً.

إذا أردنا الحفاظ على البندول المخمد "damped pendulum" يهتز عند تردده الطبيعى " natural frequency" يجب علينا إضافة طاقة إليه عند (وهو أن تعطيه دفعة صغيرة أخرى "little push") كل دورة. وهذه الطاقة الإضافية "additional energy" (تساوى c/2m) وهى أقل بكثير من الطاقة التي وضعناها في البندول لكى يتحرك فى البداية.

هذا واضح جداً عندما كنت تفكر في دفع "pushing" الطفل على أرجوحة. الدفعة الأولى " first push" هي الأصعب، ولكن بعد ذلك كنت تحتاج فقط إلى الضغط بخفة "push lightly" للحفاظ على الطفل يتحرك.

١-١- التردد الطبيعي للجسم "Natural frequency"

تعريفة :-

هو تردد يحدث عنده تبادل للطاقة بين كل من طاقتى الوضع والحركة (عدم وجود تخميد). وهو التردد الذى يرغب فيه الجسم إذا إهتز حراً أن يهتز به.

وهو التردد الذى تنعدم فيه مقاومة الجسم لوجود قوتان متساويتان فى المقدار ومتضادتان فى الإتجاه (Fstiffness = - Finertia).

عند الطرق على أي جسم فإنه يهتز والمدهش أنه في كل مرة تطرقه يهتز بنفس التردد بغض النظر عن قوة الطرق، أى أن التردد الخاص بالنظام المهتز الغير خاضع للتخميد هو التردد المسموح للإهتزاز به ويسمى تردد الرنين.

وإذا سحبنا البندول "pull" مثلاً للخلف وتركناه "release" سوف يتأرجح ذهاباً وإياباً عند تردده الطبيعي.

والتردد الطبيعي f_n للبندول (بالهيرتز) يحسب بالمعادلة الآتية:-

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$ (معادلة ١)

حيث :-

f_n= التردد الطبيعى (هرتز).

g = عجلة الجاذبية الأرضية (متر/ ث٢).

l = طول البندول (متر).

مثال :- ما هو التردد الطبيعي لبندول طوله متر واحد؟

تذكر أن عجلة الجاذبية الأرضية = 9.8 m/sec^2 وقيمة g/l = 9.8 الجزر التربيعى لها = 3.13 تقريباً.

وبالتعويض فى المعادلة السابقة يكون الناتج = 0.498 هرتز (أى ما يقرب من نصف دورة لكل ثانية، بالرغم أنها قليلة ولكن موجودة).

وهناك بعض التطبيقات الحياتيه على ظاهرة الرنين غسالة الملابس وحافلة نقل الركاب تهتز بعنف عندما يهتز المحرك بالتردد الطبيعي.

ومن المعروف أن الرنين هو الذي يسبب تكسر الزجاج عندما يصيح مغني الأوبرا بصوت تردده يساوي التردد الطبيعي للزجاج.

وعادةً ما تؤمر تشكيلات الجنود بكسر الإنضباط فى الحركة عند عبور الجسور حتى لا يؤدى تناغم وقع خطاهم وإنضباطه فى دفع الجسر للإهتزاز تحت تأثير الرنين مما يؤدى إلى تكبير وتضخيم

الإهتزاز وانهيار الجسر مثلما حدث لجسر مانشستر (Manchester) بإنجلترا وجسر أنجوه (Anjou) بفرنسا.

والرنين له استخدامات مفيدة فى الآلات الموسيقية المزمارية والوترية وفي الدوائر الكهربائية (الموالفة) عند إختيار القنوات الإذاعية.

وإذا أخضعنا النظام المهتز السابق للتخميد وأثرنا عليه بقوة خارجية لكي يستطيع الإهتزاز بإستمرار

رياضياً تردد الرنين f_r "resonant frequency" للنظام المهتز قسرياً يمكن التعبير عنه كالآتى:-

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$ (معادلة ٢)

أو .....

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l} - \left(\frac{c_1}{2m_1}\right)^2 - \left[\left(\frac{c_2}{2m_2}\right)^2 - \cdots - \left(\frac{c_n}{2m_n}\right)^n\right]}$$ (معادلة ٣)

أو .....

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l} - \left(\frac{c_1}{2m_1}\right)^2 - \left(\frac{c_2}{2m_2}\right)^2 - \left(\frac{c_3}{2m_3}\right)^2 - \left(\frac{c_4}{2m_4}\right)^2}$$ (معادلة رقم ٤)

هذه المعادلة هى تعبير مبسط لتردد الرنين المخمد "damped resonant frequency" عندما تكون هناك كتل متعددة (m1,m2,m3,m4) ومصادر متعددة للتخميد(c1,c2,c3,c4).

هذه معادلة معقدةً جداً، وسوف تستغرق بعض الوقت لتحديد التخميد عند كل مصدر"source". عادةً فى الصناعة ليس من الضرورى تحديد جميع مصادر التخميد وحساب هذه المعادلة المعقدة. وبما أن التخميد صغيراً، الفرق بين المعادلة المبسطة رقم (١) والمعادلة الأكثر تعقيداً رقم (٣) سوف يكون صغيراً.

حيث :-

f_r = تردد الرنين للنظام القسرى (هرتز) "resonance frequency of forced system"

g = عجلة الجاذبية الأرضية (سنتيمتر / ث٢) "acceleration due to gravity"

l = طول البندول (سنتيمتر) "length of the pendulum"

c1 = تخميد الإهتزازات عند المصدرالأول (جرام– ثانية/سنتيمتر) " damping at the first source"

m1 = الكتلة الأولى $\left(\frac{gm-sec^2}{cm}\right)$ "the first mass"

c2 = تخميد الإهتزازات عند المصدر الثانى (جرام– ثانية/سنتيمتر) " damping at the second source"

m2 = الكتلة الثانية $\left(\frac{gm-sec^2}{cm}\right)$ "the second mass"

c_n = عدد (n) من تخميد الإهتزازات (جرام– ثانية/سنتيمتر) "damping at the n[th] source"

m_n = عدد (n) من الكتل $\left(\frac{gm-sec^2}{cm}\right)$ "the n[th] mass"

١–٢– الإهتزازات القسرية فى الأنظمة الميكانيكية "forced vibration"

في النظام المهتز الخاضع للتخميد يجب تطبيق قوة خارجية على النظام المهتز لكي يستطيع الإهتزاز بإستمرار وإلا فان النظام سوف يتوقف عن الإهتزاز بسبب التخميد و فقدان الطاقة الى الوسط المحيط.

البندول ليس الأفضل فى تمثيل النظام المهتز فى الصناعة. الأنظمة الميكانيكية يمكن توضيحها أفضل كما لو كان نظام "ياى– كتلة" "spring-mass" معلق من (أو محمول على) نقطة ثابتة كما هو مبين فى الشكل (١).

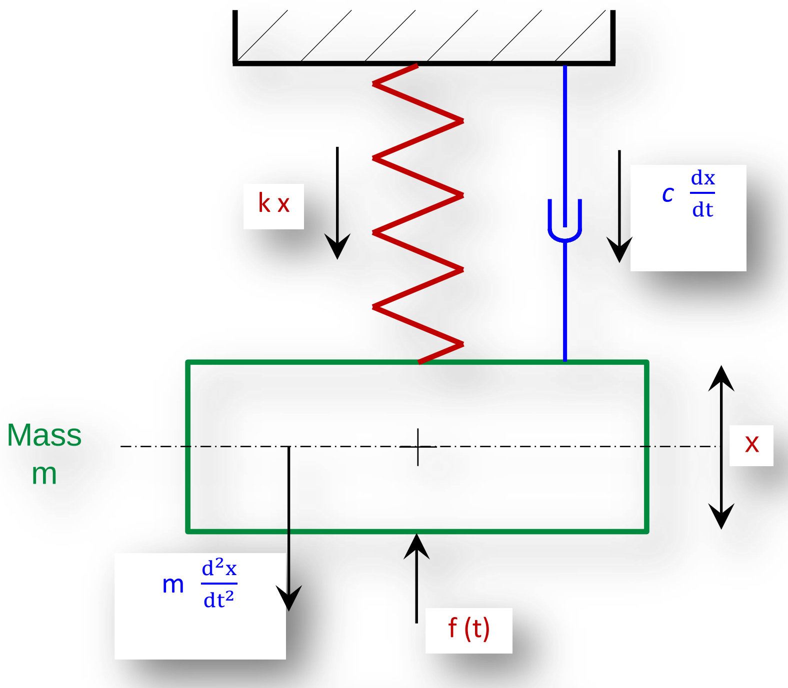


Figure 1 – *a spring-mass system*

كتله (m) معلقة من نقطة ثابته بواسطة ياى "spring" وميكانزم التخميد. اليای له ثابت (k) يسمى ثابت اليای "spring constant"، وميكانزم التخميد له ثابت (c). والخط صفر(line 0) عند السكون "at rest" كما هو مبين بالشكل والحركة فوق الخط صفر تكون حركة موجبة (+) والحركة تحت الخط صفر تكون حركة سالبة (–).

إذا تم سحب "pulled" الكتلة إلى أسفل وتركها "released"، سيهتز النظام إهتزاز حر " free vibration" عند تخميد التردد الطبيعى للنظام "damped natural frequency". الكتلة تتمايل

"bob" صعوداً وهبوطاً إلى أن يجبرها التخميد على التوقف. التردد الطبيعى الغير مخمد "undamped natural frequency" (هيرتز) لنظام "ياى- كتلة" "spring-mass" يمكن تحديده بالمعادلة الآتية:-

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$ (معادلة ٥)

حيث :-

f_n = التردد الطبيعى الغير مخمد (هيرتز) "undamped natural frequency"

k = ثابت الياى (جرام/سنتيمتر) "the spring constant"

m = الكتلة (جرام- مربع الثانية/سنتيمتر) "the mass"

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$ (معادلة ٦)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l}}$$ (معادلة ٧)

لاحظ أن هذه الصيغة هي مشابهةً جداً للمعادلة ١. ونلاحظ وجود (g) للياى للبندول، ولكن الآن يوجد ياى له ثابت (k) بدلاً عن ذلك. ولكن هذا النظام لديه تخميد، وجميع الأنظمة لديها تخميد. ويتضمن التخميد في المعادلة مماثل تماماً تخميد التردد المبين بالمعادلة ٢:

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$ (معادلة ٨)

حيث :-

f_c = تخامد التردد الطبيعى (هيرتز) "damped natural frequency".

k = ثابت الياى (جرام/سنتيمتر) "the spring constant".

m = الكتلة (جرام- مربع الثانية/سنتيمتر) "the mass".

c = تخميد الإهتزازات (جرام- ثانية/سنتيمتر) "damping".

حيث أن عنصر التخمد "component" يساوي $\left(\frac{c}{2m}\right)^2$.

وأخيراً، يتم حساب تردد الرنين القسري "forced resonant frequency" لنظام الياى-الكتلة "mass-spring" كالآتى:-

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c_1}{2m_1}\right)^2 - \left[\left(\frac{c_2}{2m_2}\right)^2 - \cdots - \left(\frac{c_n}{2m_n}\right)^n\right]}$$ (معادلة ٩)

حيث :-

f_r = تردد الرنين للنظام القسرى (هرتز) "resonance frequency of forced system".

k = ثابت الياى (جرام/سنتيمتر) "the spring constant".

m = الكتلة (جرام- مربع الثانية/سنتيمتر) "the mass".

c1= تخميد الإهتزازات عند المصدر الأول (جرام– ثانية/سنتيمتر) " damping at the first source".

m1 = الكتلة الأولى ($\frac{gm-sec^2}{cm}$) "the first mass".

c2 = تخميد الإهتزازات عند المصدر الثانى (جرام– ثانية/سنتيمتر) " damping at the second source".

m2 = الكتلة الثانية ($\frac{gm-sec^2}{cm}$) "the second mass".

c_n = عدد (n) من تخميد الإهتزازات (جرام– ثانية/سنتيمتر) "damping at the nth source".

m_n = عدد (n) من الكتل $\left(\frac{gm-sec^2}{cm}\right)$ "the nth mass".

المعلومات داخل الأقواس تحتوى على تخميد وكتل مختلفة وهى جزء من دالة القوى " forcing function". ونتخيل الآن أن هناك موتور داخل الكتلة (أو أن الكتلة هى الموتور)، وأن هذا الموتور به عدم إتزان "imbalance". كلما تحرك الموتور فإن عدم الإتزان ينتج عنه دالة قوة تتغير مع الزمن، و أن دالة القوة تتغير زاويتها بإستمرار مع الزمن أى أنها تشبه تحرك عقرب الثوانى للساعة حيث يلف ٣٦٠ درجة.

عدم الإتزان فى الروتور ينتج عنه دالة قوى "forcing function" عند دوران الموتور. هذه دالة القوة تجعل الكتلة تتحرك صعوداً وهبوطاً عند تردد دالة القوة "forcing function" وليس عند التردد الطبيعى "natural frequency".

٢– منحنى الإستجابة للإهتزاز القسري

إذا أجبرنا نظام الياي– الكتلة ليهتز بواسطة محرك، والرسم الآتى يوضح كيف أن النظام يستجيب لمدى واسع من ترددات الموتور.

وإذا إفترضنا أننا ربطنا وحدة تحكم فى تغيير السرعة إلى المحرك. والرسم البيانى الآتى يبين تردد الموتور على طول محور السينى "x axis" ومقدار السعة على طول المحور الصادى "y axis".

عندما نقوم بتشغيل المحرك حتى تصل سرعته إلى سرعة التشغيل، ونبدأ بتردد ١٠ هرتز ونزيد التردد ببطئ وتدريجياً ونقيس السعة ونوقعها على الرسم وعند إنتهاء الرسم نحصل على الرسم كما بالشكل (٢):–

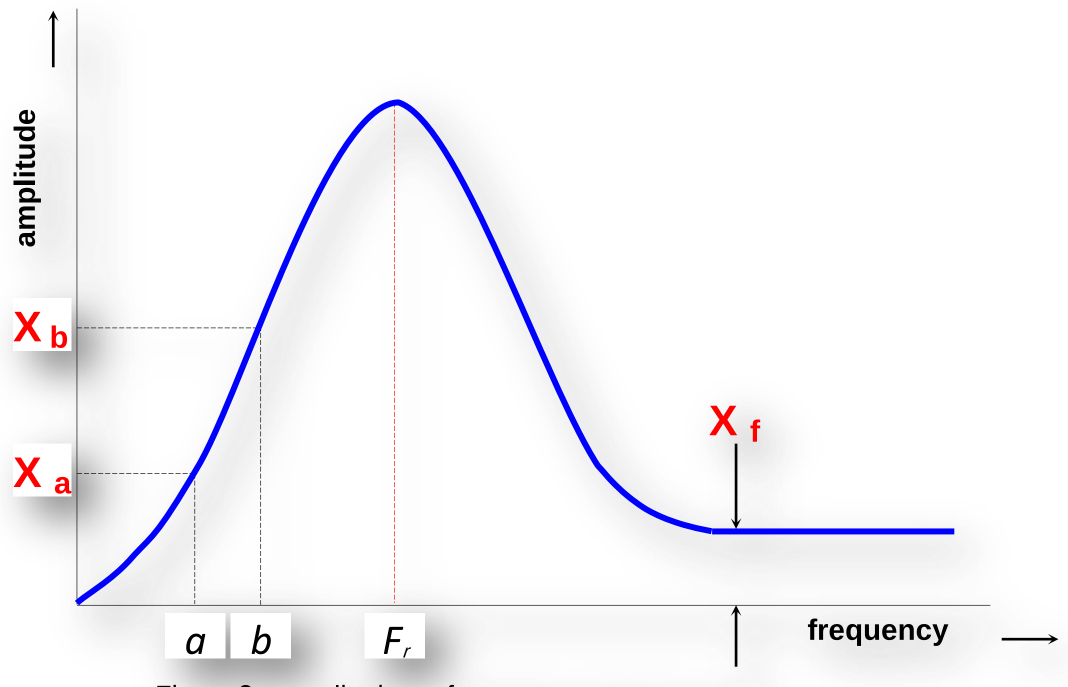


Figure 2 – amplitude vs. frequency response curve

هذا الرسم يمثل إستجابة النظام لدخول طاقة ثابتة. وفى حالة نظام الياي– الكتلة، الطاقة المدخلة تأتى من عدم إتزان روتور الموتور. ونفترض أيضاً أن هذه الطاقة ثابتة على مدى نطاق التردد "frequency range". ومع هذه الطاقة الثابتة يمكننا الحصول ببساطة على نطاق واسع من السعة "wide range of amplitude" عن طريق تغيير التردد.

على سبيل المثال، تشغيل المحرك عند تردد (a) كما هو مبين في الشكل يعطي السعة (X_a). وهناك كمية أكبر من الحركة يمكن الحصول عليها عند نفس الطاقة بواسطة تشغيل الموتور على تردد أعلى عند تردد (b) يعطى سعة (X_b). الخط المنقط (باللون الأحمر) في أسفل منتصف الرسم البياني يقطع بالضبط قمة المنحنى "peak" ويكون عند تردد الرنين F_r (resonant frequency). عند هذا التردد دالة القوى "forcing function" تسبب أكبر قدر من الحركة "movement". تشغيل النظام عند تردد رنينها ينتج عنها دائما أقصى سعة للنظام "maximum amplitude". وأخيراً لاحظ أن المنحنى يبدأ عند الصفر (0)، فى بداية الرسم البيانى وهذا أمر منطقى لأنه عند هذه النقطة الموتور لا يعمل (off) ولايوجد إهتزازات "no vibration".

وكلما زاد التردد زادت السعة وعندما يصل التردد إلى تردد الرنين F_r (resonant frequency) ويعرف أيضاً بالتردد القسري تكون السعة عند أقصى قيمة. وتبدأ السعة فى الإنخفاض تدريجياً كلما زاد التردد عن F_r. ولكن السعة لا يمكن أبداً أن تعود إلى الصفر (0). وبدلاً من ذلك فإن المنحنى

يمر فى خط مستقيم وتسمى **X_f** أو سعة المسافة الحرة "free space amplitude" وفيها لايحدث تضخيم أو تكبير بسبب الرنين "resonance".

٢-١- نطاق تضخيم التردد "amplification range"

لقد ذكرنا عدة مرات من قبل أن منحنى استجابة التردد في الشكل (٢) هو نتيجة لإدخال طاقة ثابتة على مدى نطاق التردد. وإذا كانت الطاقة المدخلة ثابتة فلماذا تتغير السعة كثيراً ؟

والإجابة هى أنه عند أو بالقرب من F_r، يقوم النظام فى الواقع بتكبير إستجابته تبعاً للطاقة المدخلة الناتجة من دالة القوة (عدم إتزان الروتور). فإذا رسمنا خط أفقى من X_f أو سعة المسافة الحرة "free space amplitude" فى إتجاة المحور الصادى "y axis"، فإن الخط سوف يقطع "intersects" المنحنى فى نقطتين كما هو مبين فى شكل (٣).

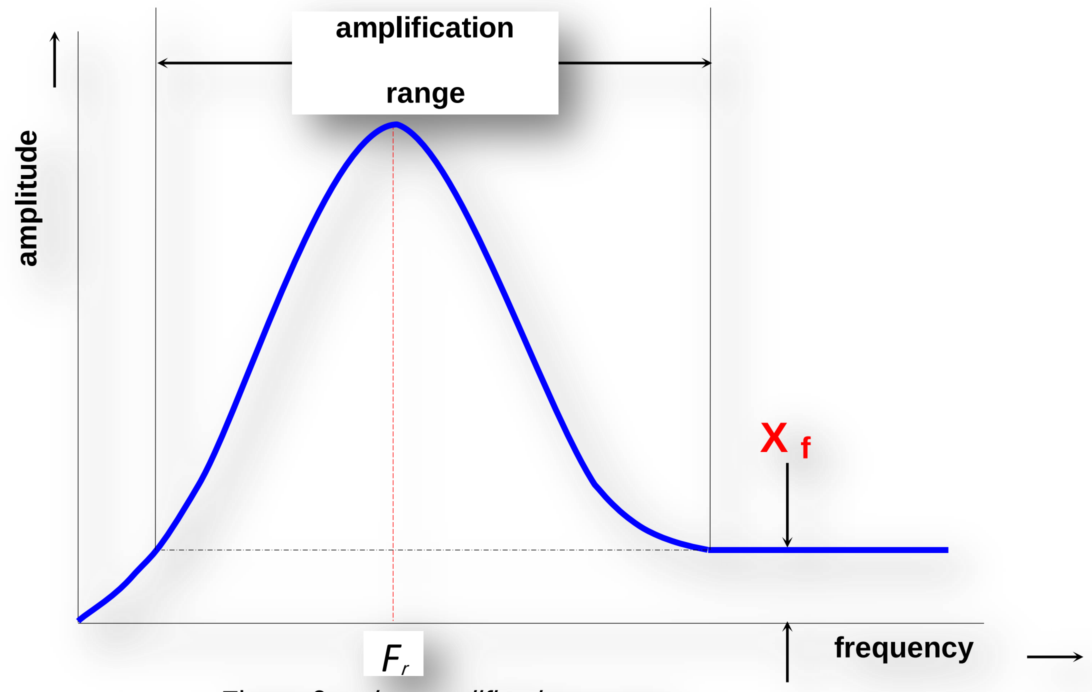


Figure 3 – *the amplification range*

هاتين النقطتين هى حدود "boundaries" نطاق تضخيم النظام (وتسمى أيضاً نطاق السرعة الحرجة).

في نطاق التضخيم "amplification range" يقوم النظام بتضخيم الحركة الإهتزازية الناتجة من تأثير دالة القوة "forcing function".

فى بداية المنحنى أسفل نطاق التضخيم "amplification range" السعة تزيد مع التردد إلى أن تصل إلى سعة المسافة الحرة "free space amplitude" وإذا إستمر زيادة التردد فإن السعة تدخل

نطاق التضخيم ويتم تضخيم السعة من قبل النظام إلى قيمة أعلى من سعة المسافة الحرة إلى أن يحدث أقصى تضخيم عند تردد الرنين "F_r"، والتى تمثل منتصف نطاق التضخيم. وكلما زاد التردد خلال نطاق التضخيم وبعد F_r فإن السعة تقل دون ذلك وتستمر فى التناقص إلى أن تصل إلى سعة المسافة الحرة عند نهاية نطاق التضخيم.

ويظل المنحنى ثابت لعدم وجود تضخيم خارج نطاق التضخيم مالم يكن هناك درجة أخرى من درجات الحرية فى النظام "degree of freedom".

إذا كان تردد دالة القوة داخل نطاق التضخيم للنظام، فإن النظام يقوم بتضخيم طاقة دالة القوة. وإذا كان التردد بالقرب من إحدى حدود نطاق التضخيم "either boundary" فإن التضخيم سيكون صغيراً وإذا كان التردد على مقربة من F_r أو عندها فإن التضخيم سوف يكون كبيراً جداً وتكون النتائج كارثية "disastrous".

أمثلة على الرنين

هذا هو مغني الأوبرا قادر على كسر الزجاج بواسطة الغناء وتردد الغناء قريب جداً من تردد رنين الزجاج مما يجعل الزجاج يهتز حتى يتحطم "shatters".

وهناك تعليمات مستديمة لقوات الجيش الذين يسيرون فوق الجسور للخروج على خطوة السير المنتظمة حتى لا تسبب خطوتهم المعتادة فى أن تقود الجسر إلى منطقة تضخيم الرنين وبالتالى من الممكن أن ينهار بهم الجسر.

ومن المعروف أن إثنين على الأقل من الجسور قد انهارت بهذه الطريقة خلال منتصف القرن التاسع عشر منهم جسر فى مانشستر بإنجلترا وآخر فى أنجو بفرنسا.

٢-٢- تثبيت منحنى الإستجابة للإهتزاز القسرى

قلنا أن منحنى إستجابة النظام كما هو مبين فى شكل (٢) يمثل إستجابة النظام لدخول طاقة ثابتة ناتجة من عدم إتزان الموتور والمعادلة الآتية تبين أن قوة عدم الإتزان ليست ثابتة إذا زادت قيمة ω^2.

والمعادلة تحتوى على ثابتين هما Ub وهو خاص بعدم إتزان روتور المحرك و g وهى العجلة الناتجة عن الجاذبية الأرضية.

والمتغير الوحيد فى المعادلة هو ω^2 وهو التردد الدائرى "circular frequency"

$$F_u = \frac{\omega^2\ \mathrm{Ub}}{g} \qquad \text{(معادلة ١٠)}$$

F_u = القوة نتيجة عدم الإتزان Ub "force due to imbalance".

ω^2 = مربع التردد الدائرى للموتور (راديان/الثانية) " the square of the circular frequency of the motor".

Ub = كمية عدم الإتزان (جرام/سنتيمتر) "the amount of imbalance".

g = عجلة الجاذبية الأرضية (سنتيمتر/ ث٢) "acceleration due to gravity".

إذا زودنا تردد الروتور ببطئ كما فعلنا سابقاً وبالتالى قيمة ω^2 تزداد وكلما زادت ω^2 تزداد قيمة القوة الناتجة من عدم الإتزان F_u تبعاً لذلك تناسبياً.

فكيف يمكن أن تكون هذه الطاقة المدخلة ثابتة عندما تزيد قوة عدم الإتزان مع زيادة التردد؟ ما يجب القيام به (وما قمنا به) هو لتطبيع "normalize" منحنى الإستجابة. ومعنى التطبيع "جعله ثابت" لذلك يجب علينا بطريقة أو بأخرى جعل الموتور بعيداً لجعل الطاقة ثابتة عبر المنحنى وذلك عن طريق إخراج التردد من المنحنى.

شاهدنا في وقت سابق أن العجلة "acceleration" هي المشتقة الثانية من الإزاحة "displacement". وبالتالي التكامل المزدوج "double integration" للعجلة ينتج عنه الإزاحة. التكامل المزدوج للعجلة يكون بالقسمة على ω^2، وبالتالى أمكنا إخراج التردد.

تبعاً للعلاقة الرياضية الآتية لكل من الإزاحة والسرعة والعجلة:-

الإزاحة "displacement" = x

السرعة "velocity" = x ω

العجلة "acceleration" = $x\ \omega^2$

وإذا أردنا قياس مدى إستجابة نظام الياي–الكتلة "spring-mass" نحتاج أولاً إلى إثارته لكى يهتز. بواسطة محرك صغير متغير السرعة يتم جعله غير متزن بشكل متعمد "deliberately" وذلك بوضع وزن صغير "small weight" مثل مسمار على إحدى جوانب العمود "shaft" ويعتبر ذلك مثير جيد.

ونستخدم لاقط الإهتزاز "accelerometer" لقياس القوة الناتجة من عدم الإتزان.

والشكل (٣) يظهر منحنى الإستجابة حيث أن المحور السينى "x axis" يمثل التردد "frequency" والمحور الصادى "y axis" يمثل القوة "force" (acceleration).

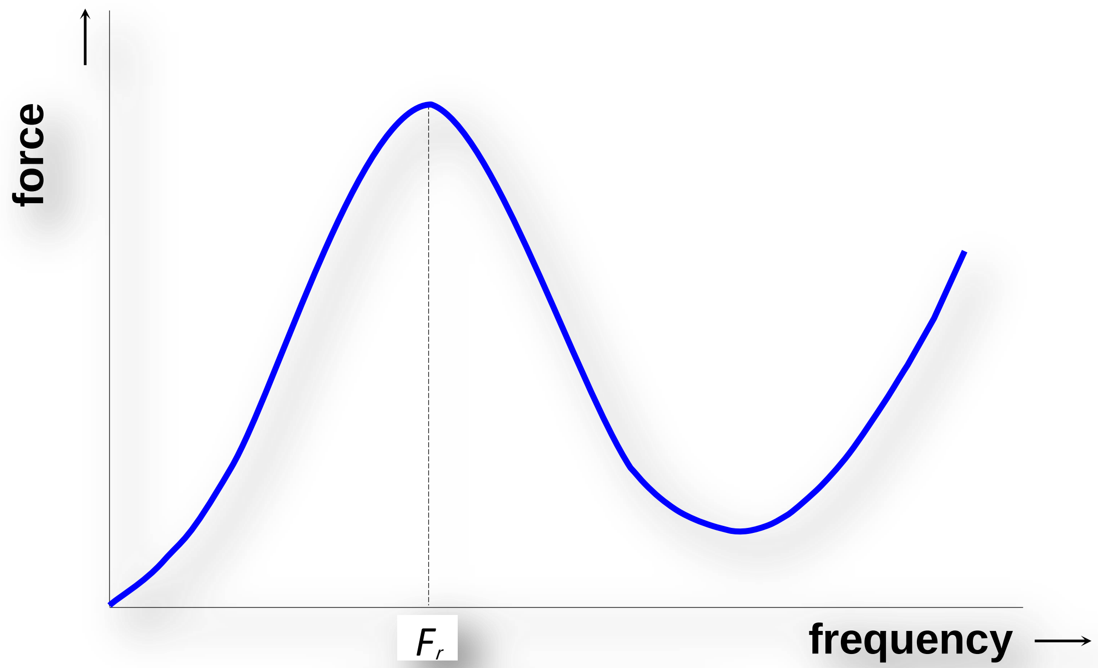


Figure 4 :- Response Curve

وإذا قمنا بعمل تكامل مزدوج (الضعف) على منحنى الإستجابة "response curve"، وذلك بقسمة كل قيمة على طول المنحنى بواسطة ω^2 تكون النتيجة هى الإزاحة "displacement" وهذا يؤدى إلى منحنى الإستجابة كما رأيناه فى شكل (٢).

وبمجرد إزالة مكون التردد ω^2 فى المعادلة السابقة عن طريق التطبيع "normalize" تصبح قوة عدم الإتزان Ub/g والمنحنى الآن أصبح يمثل إستجابة النظام لدخول طاقة ثابتة.

$$F_u = \frac{\text{Ub}}{\text{g}}$$

ومنحنى الإستجابة الذى تم تطبيعه "normalized" مازال يحتوى على تلك القمة "peak" بسبب تضخيم الرنين لطاقة دالة القوى "forcing function energy " ولكن سعة المساحة الحرة " free space amplitude" خارج نطاق التضخيم تكون الآن ثابتة.

٣- الرنين فى الأنظمة الديناميكية "Resonance in Dynamic Systems"

يوجد نوعين من الإهتزازات هى "two types of vibration" الإهتزازات القسرية والإهتزازات الناتجة من الرنين "resonance" و جميع الإهتزازات التى تحدث لأى نظام هى مزيج من الاثنين معاً ومستويات الإهتزازات الناشئة من الإهتزازات القسرية "forced vibrations" على الماكينات التى تم تصميمها بشكل جيد، ومتزنة، وتم تجميعها بإتقان وضبطت محاورها عادة ما تكون تعمل بنعومة وهدوء وتخدم فترة طويلة وهذا متوقعاً من وجهة النظر الميكانيكية.

ومع ذلك فى حالات معينة قد تحدث نتائج أخرى غير مرغوب فيها نتيجة تغير خصائص كل من الكتلة "mass"، الصلادة "stiffness" والتخميد "damping".

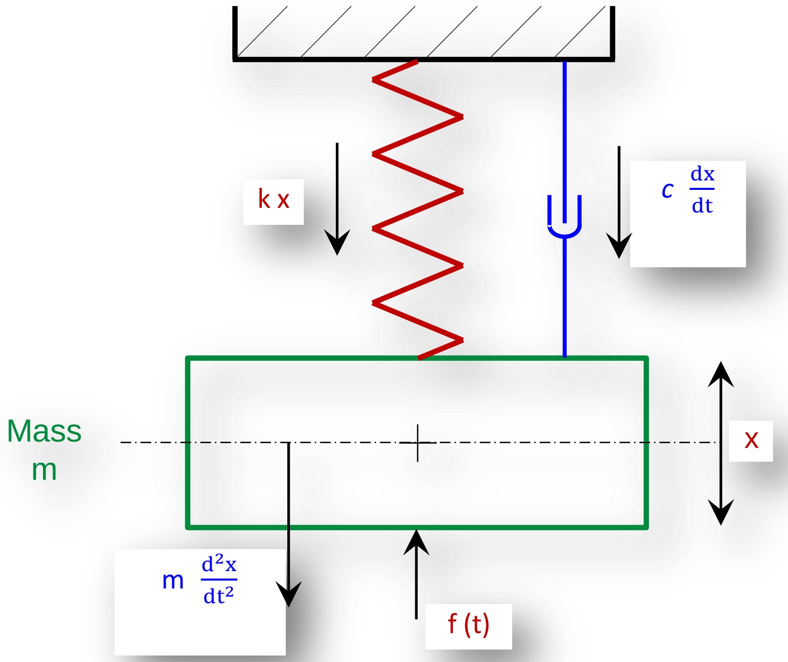


Figure 5 – *a spring-mass system*

ويمكن تمثيل النظام المهتز بماكينة بسيطة عبارة عن كتلة "mass" وصلادة "stiffness" وهى تمثل حركة الياى"Spring" وتخميد "damping" ويطلق على هذا النظام المهتز نظام حرية من الدرجة الأولى "single-degree-of-freedom" كما فى الرسم البيانى التالى.

وتوزيع القوى الناشئة نتيجة الإزاحة الديناميكية x "dynamic displacement" تحددها المعادلة التالية:

مع إهمال قوة الإثارة الخارجية "external excitation" نجد أن:-

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

(Mass–Inertia)+(Damping–Velocity)+(Stiffness–Displacement)=Excitation Force

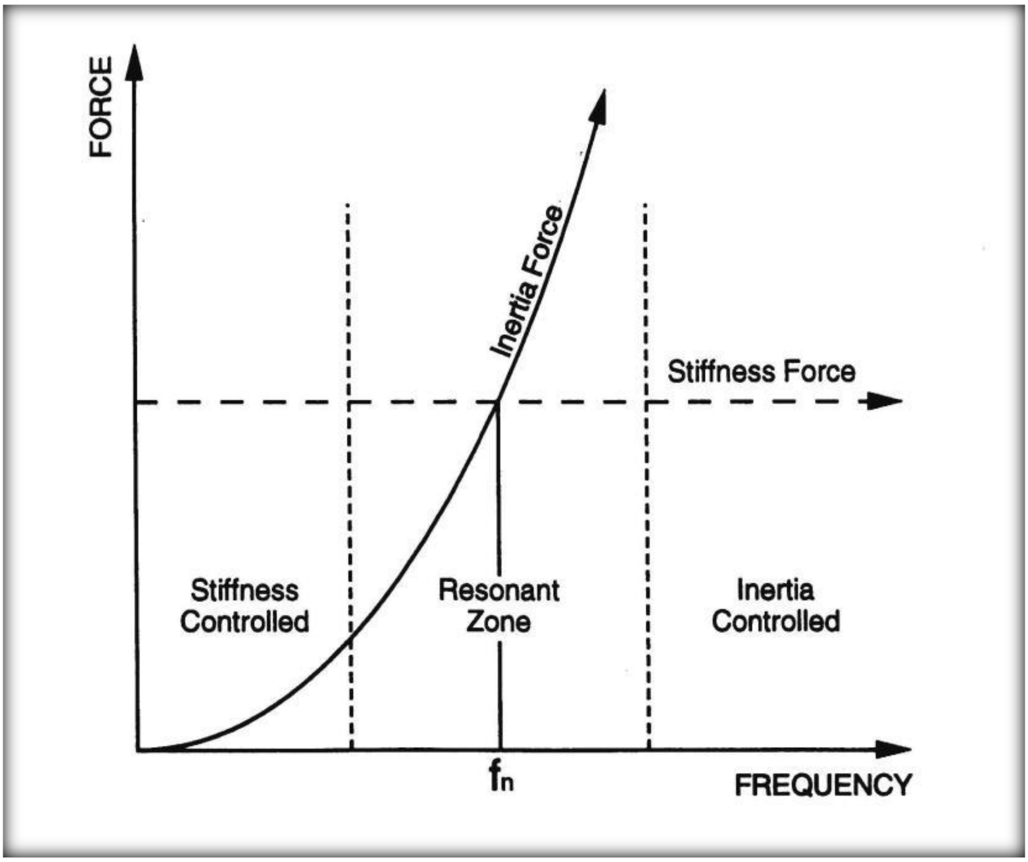
هذه المعادلة تحدد الحركة الحرة للكتلة كنظام قائم بذاته وحل المعادلة للزمن t سيحدد التردد الطبيعي للنظام.

وهناك طريقة مفيدة لفهم هذا النظام هو عمل الحل بإستخدام الرسومات. وإذا قلنا أن معامل التخميد c صغير "damping coefficient" بحيث يمكن تجاهله وبذلك يمكننا إعادة المعادلة مجدداً على النحو التالي: –

$$m\ddot{x} = -kx$$

(Mass – Inertia) = (Stiffness – Displacement)

إذا رسمنا رسم بيانى يمثل المعادلة السابقة فإننا نحصل على الرسم التالى (لاحظ أننا أهملنا الإشارات للتبسيط)



يتضح جداً من الرسم البيانى أنه في النقطة التي تتساوى فيها القوتان الصلادة "Stiffness" والقصور الذاتى "Inertia" لا يوجد أي سيطرة أو كبح على نحو فعال على النظام! وأى قوة خارجية تؤثر على النظام عند هذا التردد سوف تسبب حركة للنظام عند سعة لا نهاية لها وسوف يدمر النظام ذاتياً "self-destruct" وهذا يعرف بالتردد الطبيعي "Natural Frequency" للنظام وكما هو معروف مصادفةً أن قوة الإثارة "excitation force" عند التردد الطبيعي " natural frequency" يعرف بالرنين "Resonance".

بالطبع لقد افترضنا سابقاً عدم وجود التخميد "no damping" $c\dot{x}$، وهذا هو الوقت والمكان الذى يأتى فيه التخميد لإنقاذ الموقف.

وكلما زادت مستويات السرعة حتى لو كان معامل التخميد منخفضاً "damping coefficients" فإن له تأثير كبير فى إمتصاص الطاقة ومنع النظام من تدمير نفسة ذاتياً.

وتسمى الإهتزازات التى تحدث عند التردد الطبيعى الإهتزازات الحرة "Free Vibration" وبالطبع لها إستخداماتها القيمة فى أشياء مثل الأجراس "bells" والآلات الموسيقية وعلى ترددات أعلى من ذلك بكثير فى بث الراديو. وجميع المهندسين يعانون من ظاهرة الرنين وما لها من تأثير كبير على تكبير الإهتزازات وتأثيرها التدميرى على المعدات والهياكل.

ومن المؤكد أن يكون ذلك راجعاً لإعتبارات سوء التصميم والمستفيد الوحيد من ظاهرة "الرنين" إستشاريوا الإهتزازات الذين يكسبون الكثير من المال في حل وإصلاح المشاكل الناجمة عن هذه الظاهرة.

وشهد جميع طلاب الهندسة صور لكارثة جسر تاكوما "Tacoma Bridge disaster" في ولاية واشنطن منذ سنوات عديدة. وهذه كانت حالة حاسمة بوضوح للإثارة الناتجة عند التردد الطبيعى للجسر مع ضعف عامل التخميد فنتج سعة تدميرية عالية للإهتزازات " destructive amplitudes of vibration".

٣-١- الرنين وإنهيار جسر مضيق تاكوما واشنطن

جسر تاكوما واشنطن هو عبارة عن زوج من الجسور المعلقة بطول ١٦٠٠ متر تقريباً، فتح لحركة المرور في ١ يوليو ١٩٤٠ وبعد مرور ٤ أشهر إنهار الجسر بسبب الرياح في واقعة غريبة لم يتوقعها أحد.

وبمقارنة هذا الجسر بالجسور المعلقة الأخرى في ذلك الوقت كان جسر تاكوما ناروز طويل بشكل غير عادي وكان التصميم الأصلي يؤكد إلى التشديد على دعامات الجسر وللأسف كانت هذه الدعامات غير كافية.



الرياح تهب فوق وتحت سطح الجسر فينشأ عنها ضغط للهواء، مما يؤدى لتحرك الجسر صعوداً وهبوطاً. وإستمرار الرياح نسبياً على طول الجسرسترفع الجسر إلى أعلى وبالتالى تتغير زاوية الهجوم مُخفضةً للإرتفاع إلى أن تسحب الجاذبية الجسر إلى أسفل. وبالرغم من أن قوة الإثارة ليست دورية فإن الجسر أصبح يتحرك صعوداً وهبوطاً عند تردده الطبيعى.

وخلال تحرك الجسرعند ترددة الطبيعى "natural frequency"، فإن تردد الرنين " resonant frequency" للهيكل "structure" يضخم الحركة "amplified the movement"

وكانت السعة القصوى للإهتزاز حوالى ٥ أقدام على طول مركز الجسر لدرجة أن سائقى السيارات شاهدوا أثناء عبور الجسر أن السيارة كانت تختفى عن الأنظار قبل ظهورها مرة أخرى وذلك لكبر السعة القصوى للإهتزاز.

في يوم ٧ نوفمبر ١٩٤٠ كانت الرياح تهب بسرعة ٦٧ كلم/س وتم الإبلاغ عن سعة كبيرة بشكل غير عادي وتم إغلاق الجسر أمام حركة المرور.عندها بدأ الجسر بالإهتزاز متناغماً مع موجات الرياح وقطع أحد الأحبال الفولاذية وبعد ٣/٤ ساعة قطع حبل فولاذي آخر ليتحطم بعدها الجسر ولم يصب أحد نتيجة هذا الانهيار.

هذا الانهيار والفشل سبب صدمة كبيرة للمجتمع الهندسي وأصبح السؤال المطروح هو كيف أن جسر بطول أكبر من نصف ميل ويزن عشرات الآلاف من الأطنان ينهار بسبب حركة الرياح ولكي يجد المهندسون الإجابة علي هذا السؤال بدؤا بتطبيق علم ديناميكية الهواء "aerodynamics" في تصميم الجسور ومازال الخبراء التقنييون يختلفون علي سبب إنهيار هذا الجسر لكن أغلبهم يتفق علي أن ظاهرة الرنين هي السبب وراء هذا الإنهيار وهي شبيه بالظاهرة التي تحدث عن صوت آله تؤدي الي تحطم الزجاج.

٤- إختيار تردد تشغيل النظام (سرعة التشغيل) وتردد الرنين

من المهم فهم الرنين لأن غالبية أنظمة التشغيل يكون تردد تشغيلها F_0 "operational frequency" قريبة من F_r تردد الرنين "resonance frequency" وهذا يحدث لثلاثة أسباب:-

٤-١- المنافسة "Competition".

٤-٢- التآكل "Wear".

٤-٣- طلب العملاء "Customer demand".

٤-١- المنافسة "Competition"

المنافسة بين الشركات المصنعة تلعب دوراً رئيسياً فى تردد نظام التشغيل. على سبيل المثال المنتج يمكن أن يصمم مروحة يمكن أن تعمل للأبد ويضمن عدم إهتزازها. هذه المروحة يتم تصنيع عمودها "shaft" من الصلب عالى الكربون "high-carbon" وقطرة ٦ أقدام. وكل ريشة مصنوعة من دروع من الصلب وتزن ٤ أطنان. المروحة سوف تعمل بشكل جيد أقل من F_r (resonance frequency) وهو تردد الرنين، وتزن ٨٠٠ طن وتتكلف ٧٥٠,٠٠٠ دولار.

مروحة بهذه الضخامة قد تبدو مضحكة وهى كذلك فى الواقع ومع ذلك مثل هذه المروحة لها العديد من المميزات منها أن العمود لايمكن أن ينحنى ولن يهتز (إذا كانت متزنة بشكل صحيح) وتراكم الرماد والصدأ على ريش بوزن ٤ طن قليلٌ جداً عن أن يسبب عدم الإتزان. ولكن هذه المزايا تفوق من حيث الحجم والتكلفة.

ويمكن لمنتج آخر أن يصمم مروحة أصغر بكثير من الأولى وتزن إجمالى ٤ طن فقط وتحتل مساحة أقل بكثير وتتكلف ٢٢,٠٠٠ دولار فقط.

عن طريق إزالة الكثير من الصلادة "stiffness" مما يجعل المروحة تعمل أو تدور F_0 "operational frequency" قريبة من تردد الرنين F_r "resonance frequency" وفى هذه الحالة يكون المنتج قد خفض بشكل كبير تكلفة المروحة وجعلها أكثر قدرة على المنافسة.

٤-٢- التآكل "Wear"

التآكل يؤدى إلى أن النظام الذى يعمل داخل الحدود المسموح بها "tolerance" عندما يكون جديد يكون على مقربة من F_r.

انظر إلى منحنى إستجابة النظام "system response" لعمود جديد حيث أن تردد تشغيل النظام F_0 "operational frequency" أقل بكثير من F_r وبالتالى فإن السعة تكون صغيرة.

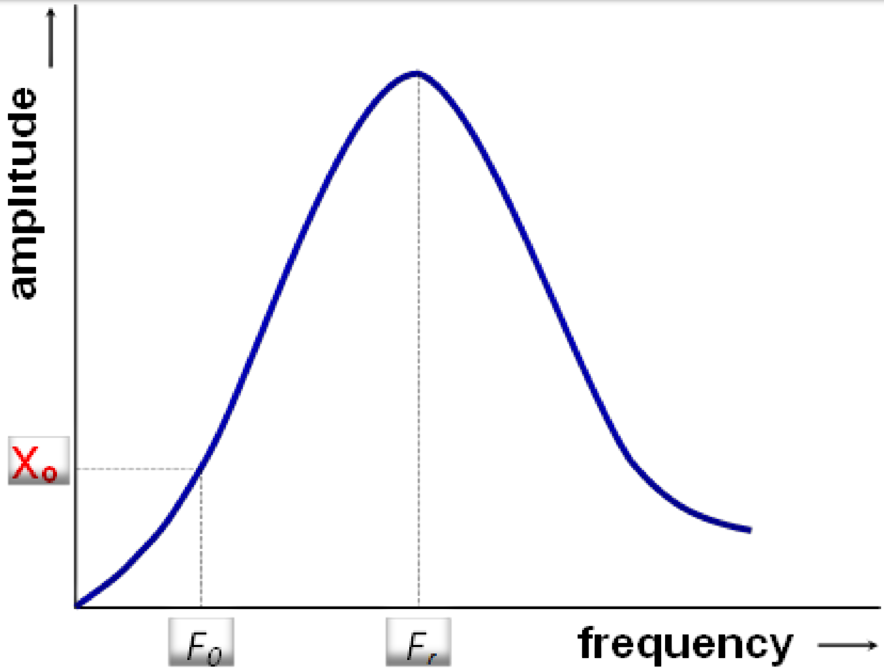


Figure 7 – system response curve for a new motor

مع مرور الوقت الكثير من الأشياء تبلى وتتآكل فمثلاً تتحول مواد حشو"grouting" قواعد الأرضيات إلى بدره، وحدوث شروخ باللحامات وزيادة فى خلوصات رولمان البللى (تذكر دائماً أن مواد التشحيم هى المصدر الرئيسى للتخميد). تأثير التآكل لايغير من F_0 ولكنه يجعل منحنى الإستجابة يتحرك "response curve". والشكل رقم (٨) يبين منحنى الإستجابة عندما يكون النظام جديد ويظهر كخط ثابت بينما الخط المنقط يعبر عن منحنى الإستجابة بعد التآكل. لاحظ أن F_0 لم تتغير ولكن مكانها على المنحنى له سعة أكبر بكثير.

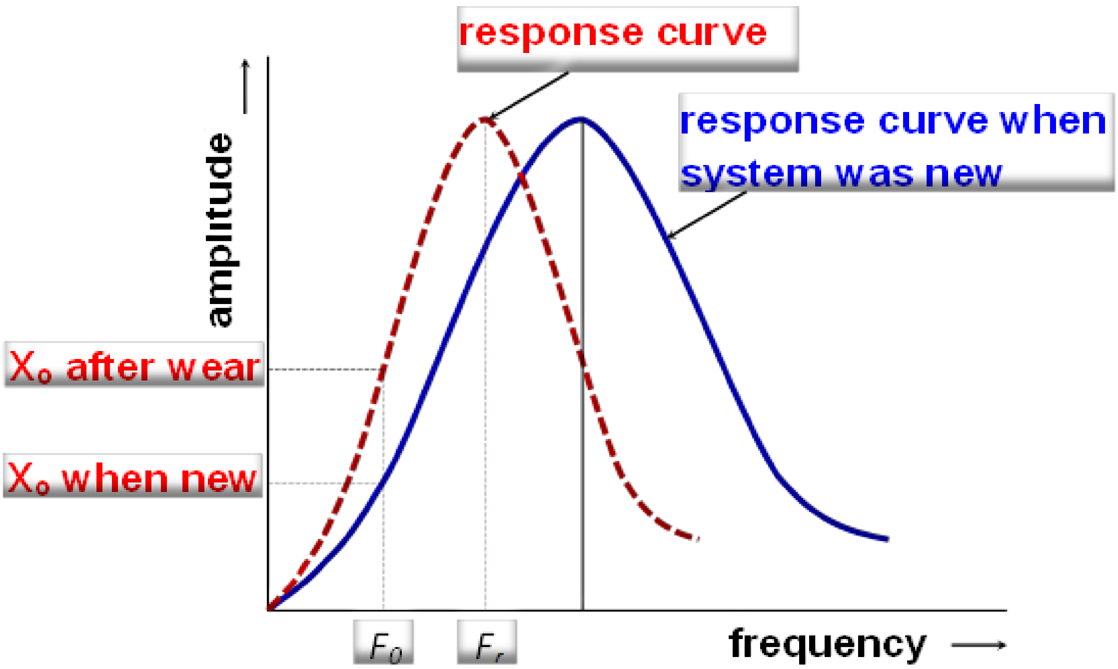


Figure 8 – the effect of wear on system response

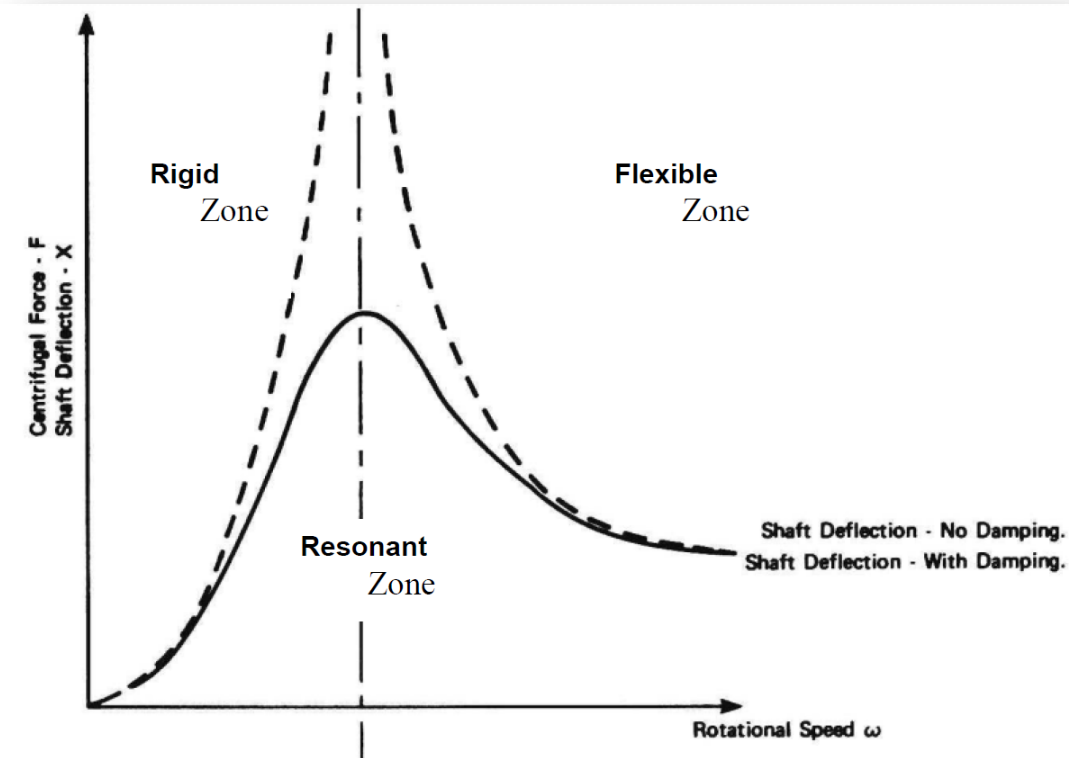
وحل مشكلة الإهتزازات "vibration problem" هو صيانة النظام "maintain the system"، وليس بعمل الإتزان له. وذلك بإعادة صب مواد الحشو للأرضية "Regrouting"، وربط المسامير للقاعدة والماكينات "hold-downs"، وإصلاح شروخ اللحامات "fixing cracked welds"، وإستبدال رولمان البلي التالف "defective bearings" كل ذلك سيجعل منحنى الإستجابة يعود لموقعه الأصلي السابق عندما كان النظام جديداً.

٤-٣- طلب العملاء "Customer demand"

وأخيراً يمكن للعميل طلب زيادة F_0 من أجل زيادة الإنتاج. وزيادة سرعة التشغيل دائماً مغرية من أجل زيادة الإنتاج، ولكن فى كثير من الأحيان عند زيادة السرعة تصبح F_0 قريبة من F_r.

٥- إدارة الرنين "Managing Resonance"

الرسم البياني التالي يظهر المنحنى الطبيعى "الكلاسيكى" لنظام الرنين. وكلما إقتربت " forcing frequency" عند التردد الطبيعى للنظام تزداد سعة الإهتزازات. وهذه المنطقة تعرف بالمنطقة الصلبة "Rigid Zone" وهى تصف سلوك معظم الماكينات المثبتة على قواعد خرسانية كبيرة "large concrete foundations" وفيها تنتقل هذه القوة إلي أرضية الماكينة "foundation" وهذه القوة تتطابق تقريباً مع حجم القوة التى تولدت فى الماكينات – أقل قوى تبددت في الجهاز نفسه.



إذا ذهبنا إلى الجانب الآخر من الرسم البياني نرى منطقة تعرف باسم المنطقة المرنة " Flexible Zone". في هذه المنطقة القوة المتولدة فى الماكينة لا تنتقل إلى الأرضية "foundation" ولكن تبدد إلى حد كبير فى الماكينة نفسها هذا هو مبدأ عزل الإهتزازات. والمنطقة ذات الإهتمام هى منطقة الرنين "Zone Resonant" تبعاً لذلك وفيها يتم تكبير أو تضخيم الإهتزازات ومشاكل الإجهادات "fatigue" أو الأحمال الذائدة هى مشاكل حيوية من المؤكد أن تحدث تبعاً لذلك.

نلاحظ أن سعة الإهتزاز عند أى تردد للإهتزازات يتناسب مع المكان الذى يقع على منحنى الإستجابة للنظام "response curve" عند نقطة أقصى رنين "maximum resonance" أى تغير فى التردد أعلى أو أسفل سوف يقلل سعة الإهتزازات (وهذا فى الواقع هو تعريف الرنين) وكلما كانت الإثارة بعيدة عن التردد الطبيعى فإن المستوى العام للإهتزازات يتناقص أيضاً.

هذا المنحنى يظهر أيضاً أنه من غير الممكن إثارة التردد الطبيعي بواسطة قوة ترددية " forcing frequencies" نصف أو ضعف التردد الطبيعى – ما لم تكن هناك توافقات "harmonics" التي تتوافق مع التردد الطبيعي.

التردد الطبيعى لعمود الدوران المجمع "shaft assembly" يسمى التردد الحرج " Critical Frequency" ويزداد الإنحراف ويصبح مفرطاً "excessive deflections" عند التردد الحرج "Critical Frequency" وتعرف بإسم دوامة العمود "Shaft Whirl". والتردد الحرج للعمود من الصعوبة تحديده بواسطة "bump test" بسبب أن السرعة تعتمد على خصائص الصلادة "stiffness".

والصلادة لكرسى تحميل فى فيلم زيت متحرك بسرعة الدوران مختلفة تماماً عن الصلادة لو كان ثابتاً.

عند السرعة الحرجة سعة الإهتزازات "amplitude of vibration" تتراكم "builds up" إلى المستوى الذى تحدده كمية التخميد المتاحة فى هذا الوقت. وقلة التخميد "lack of damping" يكون مدمراً فى بعض الأحيان بحيث يتم إجتيازه بالسرعة الحرجة سريعاً "quickly".

بعض الماكينات ذات السرعات العالية تجتاز أثناء دورانها ثلاث أوضاع حرجة "critical modes" للعمود الواحد "shaft".

عندما يدور العمود بسرعة أعلى بكثير من السرعة الحرجة "critical speed" يعرف هذا العمود بالعمود المرن "Flexible Rotor" لأنه يحدث له شكل منحرف "deflected shape" تبعاً لموضع "location" عدم الإتزان المتبقى "residual unbalance" ولضمان أن هذا الروتور ذو السرعة العالية "high-speed" يعمل بأقل إنحراف "shaft deflection" ويعرف بعدم المركزية

"Eccentricity" تكون عملية الإتزان شاقةٌ للغاية. مثال ذلك الروتور ذو الخمس مراحل الخاص بطلمبة الطرد المركزى "centrifugal pump" يجب أن يتم إتزانها تبعاً للآتى:-

1) العمود "shaft" يجب أن يكون متزناً طبقاً للحدود المسموحة "tolerance".
2) كل حدافة "impeller" يجب أن تكون متزنة طبقاً للحدود المسموحة "tolerance".
3) الحدافة "impeller" الأولى يجب أن يتم تثبيتها على العمود ويتم عمل الإتزان مرةً أخرى للمجموعة وكتل التصحيح تكون على الحدافة.
4) الحدافة "impeller" الثانية يجب أن يتم تثبيتها على العمود ويتم عمل الإتزان مرةً أخرى للمجموعة وكتل التصحيح تكون على الإمبيلير الثانية.
5) يتكررهذا العمل خمس مرات وفى النهاية بعد التجميع النهائى والإتزان يجب تصحيحه بعمل "static unbalance" على طول العمود وكذلك إتزان ديناميكى " dynamic unbalance" عند نهاية الروتور.

والنتيجة يجب أن يدور الروتور بنعومة عالية مع أدنى إنحراف "deflections". وهذا العمود الذى تم وزنه بهذه الطريقة سوف يجتاز السرعة الحرجة مع زيادة ضئيلة فى الإهتزازات.

٦- حل مشاكل الرنين

لحل مشاكل الرنين عادةً يتطلب ذلك زيادة الصلادة للماكينة أو الأرضية "stiffening" وهذا له تأثير فى زيادة التردد الطبيعى.

وقد يكون من العملى إضافة كتلة "add mass" لدفع التردد الطبيعى إلى أسفل " push the natural frequency downwards".

وهناك أساليب أخرى لإختبار وقياس وتصحيح مشاكل التردد الطبيعى وهى:-

٦-١- إختبار الصدمة أو الإرتطام (الدقدقة) "Bump Test" لتحديد الترددات الطبيعية البسيطة

يستخدم إختبار الصدمة أو الإرتطام كوسيلة سريعة وسهلة للبحث عن الترددات الطبيعية (المنسوبة للرنين) في الهياكل الخرسانية وغيرها "structure".

ويتم إجراء إختبار الصدمة بواسطة ضرب جاكوش الإختبار "hammer test" على جسم الجزء المراد معرفة تردده الطبيعى حيث أن هذه الصدمة أو الضربة تثير التردد الطبيعى للجسم وبالتالى يمكن تحديد وقياس هذا التردد.

٦-٢- Operating Deflection Shape (ODS)

إنها توفر معلومات مفيدة جداً لفهم وتقييم السلوك الديناميكى للماكينات وهياكلها مثل:-

١- كيفية تحرك الماكينة.
٢- معرفة الموضع التى تتحرك فيه أكثر وفي أي اتجاه.

٣- معرفة حركة نقطة منسوبة إلى نقطة أخرى.

٤- معرفة وجود إثارة للرنين أم لا.

٥- معرفة وجود ضوضاء منقولة للهياكل الخرسانية أم لا.

٦- معرفة تأثير الإجراءات التصحيحية على الضوضاء أو مستويات الإهتزازات.

٦-٣- Finite Element Analysis

لحساب الترددات الطبيعية ومقارنتها مع القياسات.

٦-٤- Run-up/run-down tests

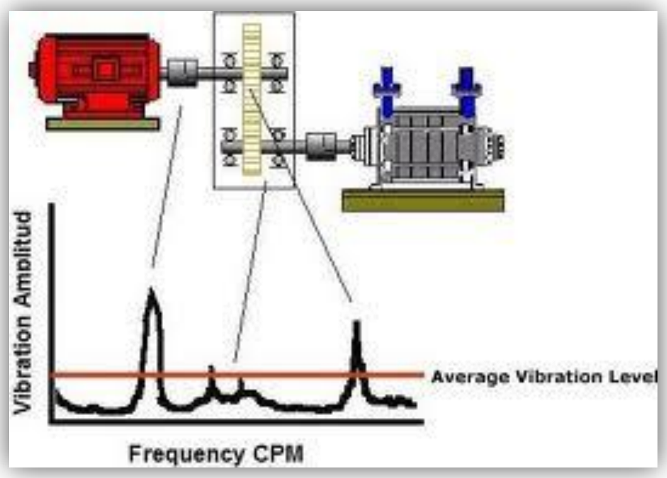
لدراسة التغير فى كل من السعة "amplitude" والطور "phase".

- النهاية -

الباب الثالث

أساسيات الإهتزازات

Vibration fundamentals



أقسام الباب الثالث

١- القسم الأول : خواص وفهم الإهتزازات

٢- القسم الثانى : الشكل الموجى وبصمة الإهتزازات وقياس الإهتزازات

٢- القسم الثالث : قياس التردد

٢- القسم الرابع : تحليل بيانات الاهتزازات

القسم الأول:- خواص وفهم الإهتزازات

مقدمه:-

إذا كنت ترغب فى أن تصبح من خبراء محللى الإهتزازات"vibration analyst". عليك أن تبدأ بالأساسيات. عليك أن تعرف كيفية قياس الإهتزازات وأن تعرف ماذا تقيس، وأن تعرف الإشارات "signals" التى يتم قياسها (بصمة المعدة، منحنى الزمن والمستوى الشامل)، ويجب أن تعرف كيفية تفسير البيانات النهائية بيانياً.

وسوف نركز هنا على أساسيات الإهتزازات. سوف ندرس الشكل الموجى "time waveform" وكذلك بصمة المعدة "spectrum" ومدى علاقتها مع الشكل الموجى والماكينة. والغرض من ذلك هو جعلك مستريح مع الشكل الموجى وبصمة المعدة.

أما القياس الفعلى ومعالجة الإشارات "signal processing" وتفاصيل التشخيص "diagnostic" سيتم تغطيتها بالتفصيل فى هذا الكتاب.

١- ما هى الإهتزازات؟

عند قياس الإهتزازات على رولمان البللى للماكينة، فأنت تقيس إستجابة الكرسى " bearing housing" إلى القوى المتولدة داخل الماكينة "Internal forces".

هذه القوى منسوبة إلى جميع الأجزاء الدوارة "rotating elements" مثل (الأعمدة "shaft"، الكرات فى رولمان البللى "balls"، وريش المراوح "blades"، بالإضافة إلى القوى القادمة أو المنقولة من العملية الإنتاجية "process" والآلات المحيطة "surrounding machines" إذا كانت الريش "impeller" غير متزنة "out of balance"، فإنك سوف تراها فى الإهتزازات. وإذا لم يتم محازاة (سنترة) أجزاء الماكينة "aligned" فإنك سوف تراها فى الإهتزازات. حتى إذا لم يتم تثبيت الماكينة بالشكل الصحيح "bolted down" فإنها ستهتز وتتأرجح وسوف ترى ذلك فى الإهتزازات. ولذلك فإنه من البديهي إذا قست الإهتزازات ونظرت فيها بعين مدربة "trained eye" يمكنك تحديد ما إذا كان هناك أى شئ خطأ بالماكينة أم لا.

ولكن كيف يمكنك معرفة ما يجب أن تبدو عليه الإهتزازات؟. حيث أن الماكينات تصنع بأشكال "shapes" وأحجام "sizes" متعددة. ويوجد زوجين "couple" من القواعد الأساسية "basic rules".

الأولى، هناك عدد من الأنماط أوالأشكال "patterns" لبصمة الإهتزازات الواجب معرفتها. وإذا كانت الماكينة غير متزنة "out of balance"، فإن بصمة الإهتزازات ستتغير "change" بشكل معين. وإذا كان هناك مشكلة مع رولمان البللى، سوف تتغير "change" بصمة الإهتزازات أيضاً ولكن بطريقة مختلفة.

الثانية، هل لاحظت إستخدام كلمة تغيير "change"؟ حسناً، كلما تدهورت "degrades" حالة الماكينة "condition" فإن مستوى الإهتزازات وشكل البصمة سوف يتغير. وعموماً سيزداد مستوى الإهتزازات "vibration level" وشكل البصمة "pattern" سوف يتغير بعدد لا يحصى "myriad" من الطرق. لذلك كل ما عليك القيام به هو قياس الإهتزازات، ومعرفة التغير ثم نعرف سبب التغيير.

١-١- طرق قياس الإهتزازات

لسنوات وسنوات كان الناس تقيس الإهتزازات. ولا يزال الناس إلى اليوم تستمع "listen" إلى الماكينات والحصول على طريقة لمعرفة حالتها. ويتم ذلك بوضع مفك "screw driver" ملاصق لآذانهم (نهاية المقبض) وتستمع إلى رولمان البللى.

وبعد ذلك جاء مقياس الإهتزازات "vibration meter" حيث يعطى مؤشراً للمستوى الشامل للإهتزازات "overall indication". وهو أكثر حساسية من الأذن، ولكنه لا يمكنه التمييز "distinguish" بين أنواع مختلفة من العيوب.

وعندما فهم الناس طبيعة الإهتزازات "nature of vibration" تم تطوير مقياس الإهتزازات "vibration meters" والذى يركز على ترددات معينة وعادةً تكون الترددات العالية " high frequencies" والتى تعطى مؤشراً عن مشاكل رولمان البللى. ولا تزال تستخدم حتى اليوم – ربما سمعت عن "shock pulse" ، "Spike energy" ، "HFD" وغيرها.

١-٢- فهم الإهتزازات "Understanding vibration"

من أجل فهم ما هو الخطأ "wrong" فى الماكينة، نحن بحاجة لدراسة الإهتزازات عن قرب أكثر من ذلك. ولكن كيف لنا أن نفعل ذلك؟ وما شكل الإهتزازات؟

كلما تحرك العمود "shaft" داخل الماكينة "inside a machine"، موتور مثلاً، فإنه يولد بعض الإهتزازات. وإذا كان رولمان البللى عديم الإحتكاك "frictionless"، ولم يكن هناك حمل "no load"، والروتور متزن جيداً "perfectly balanced" ومضبوط محاورة "aligned" بشكل جيد، وبإفتراض عدم وجود جاذبية أرضية "no gravity" فإنه من المفترض فى هذه الحالة ألا تهتز الماكينة. ولكن كل ذلك إفتراضات وتخمين "guess" ولكن فى الواقع وفى عالمنا الحقيقى الماكينة لابد أن تهتز.

حيث يوجد قوى داخلية "internal forces" تجعل الماكينة تهتز. هذه القوى قد تكون نتيجة عدم الإتزان "unbalance"، عدم المحاذاة "misalignment"، إنحناء العمود "bent shaft"، التفكك الميكانيكى "looseness"، الإحتكاك "rub"، المشاكل الكهربية "electrical problems"، وغيرها من العوامل الأخرى "other factors".

والإهتزازات التى نقيسها على الماكينات ترجع جزئياً إلى مقدار "magnitude" هذه القوى الداخلية السابقة "internal forces" وفى جزء آخر يرجع إلى خصائص الماكينة نفسها وقوى المقاومة الميكانيكية التى تتمثل فى الكتلة "mass" والصلادة "stiffness" والإخماد "damping".

١-٣- فهم الإهتزازات من وجهة نظر الماكينة

نحن بحاجة لمحاولة رؤية الأشياء من وجهة نظر الماكينة لكى نفهم بشكل أفضل الإهتزازات. ونتحدث الآن عن الحركة التوافقية البسيطة "simple harmonic motion" والصلادة "stiffness" وماشابه ذلك.

والشكل التالى يبين مروحة مكتب "desk fan" جديدة "brand new" لها عدد ٨ ريش "blade" وإذا وضعت يدك على الموتورعند تشغيله فإنه من المفترض بأنك قد لا تشعر بأى شئ (هى مروحة جيدة جداً).

نقوم الآن بإجراء تغيير على المروحة وذلك بإضافة وزن صغير جداً "epoxy" (بقعة من الدهان) إلى إحدى أطراف الريش. إجعل المروحة تعمل لفة واحدة خلال الثانية " one revolution per second" قد لا تشعر بأى شئ لأن هذا الوزن "unbalance weight" صغير جداً مقارنة بكتلة المروحة وكذلك سرعة دوران المروحة "rotating speed" ليست كبيرة بما يكفى لتوليد قوة جازبة عالية "centripetal forces".

وبزيادة الوزن "weight" على نفس الريشة وذلك بوضع عملة "coin" كبيرة وإرتداء نظارة السلامة "safety glasses" مع دوران المروحة بنفس السرعة. وإذا وضعت يدك الآن على المحرك فإنك سوف تشعر بشئ ما الآن.

ما تشعر به الآن هو نبضة "pulsation" عند كل لفة. لأنه من المنطقى أن الكتلة الموضوعة تعمل لفة واحدة فى الثانية. وإذا وضعت يدك على رأس المحرك ستلاحظ أن النبضة تصل إلى ذروتها "peak" عندما تصل الكتلة "coin" إلى الجزء العلوى من الدوران "on top" وكذلك الجزء السفلى.

نلاحظ أن الكتلة تتحرك صعوداً وهبوطاً وتشبه تحرك كرة على ياى "ball on a spring" ونسمى تلك الحركة (الحركة التوافقية البسيطة "simple harmonic motion") ويمكن القول إذا جاز التعبير أن العملة "coin" على المروحة هى مصدر "source" الإهتزازات، والقوة "force" الواقعة على المروحة والإهتزازات التى تشعر بها تتوافق أيضاً مع حركة الكتلة صعوداً وهبوطاً.

٢- خواص الإهتزازات "Characteristics of vibration"

٢-١- إستخدام حركة البندول للتعرف على الإهتزازات

الإهتزازات هى حركة أى جسم (تردد أى جسم) حول مرجع معين له.

وحركة البندول هى أبسط نظام للإهتزازات وسوف نستخدم البندول للتعرف على الإهتزازات ومثل أى نظام ميكانيكى يتكون من ثلاث أجزاء هى:-

١- الكتلة "Mass"

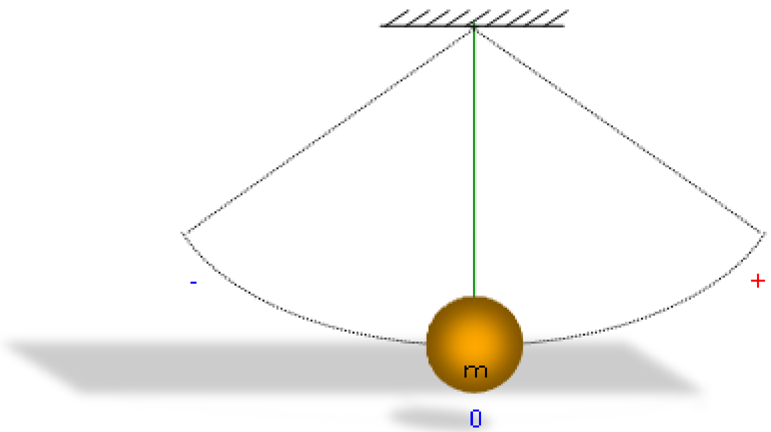
الكتلة يتم تعليقها فى نهاية البندول ونفترض أن الخيط الممسك للكتلة كتلته صفر (أى لا وزن له) ونتعامل مع هذه الكتله على أنها الوزن الوحيد للنظام.

٢- الزنبرك "Spring"

عندما يكون البندول فى حالة حركة فإن الجاذبية الأرضية "Gravity" تؤثر عليه وتعمل مثل قوة الإستعادة "Restoring force" لتدفعه إلى العودة إلى حالة السكون.

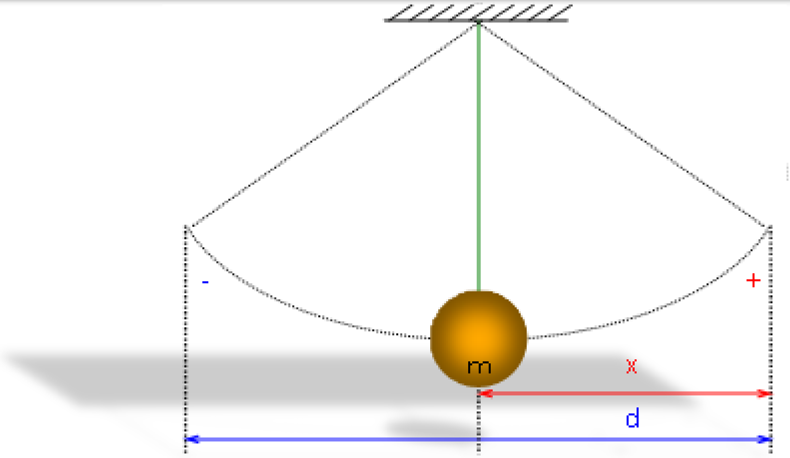
٣- الإخماد "Damping"

وهو الإحتكاك المؤثر عند محاور الإرتكاز بالإضافة إلى مقاومة الهواء وإذا وضع البندول فى مكان مفرغ من الهواء "Vacuum" لإزالة تأثير مقاومة الهواء "Air resistance" فإنه يتبقى تأثير كل من الإحتكاك عند محاور الإرتكاز (تخميد الإحتكاك) وإحتكاك الجزيئات "Molecular" فى الخيوط نفسها (تخميد التخلف المغناطيسى) ومن الأفضل الآن أن نهمل الإخماد مؤقتاً وهذا يسهل من إمكانية التعرف على الإهتزازات.



ونفترض أن البندول عندما يتحرك يستمر فى الحركة إلى ما لا نهاية. وعند شد البندول إلى الخلف "Pulled back" وتركه "Released" يستمر فى الحركة ويتأرجح للخلف والأمام (أى يهتز) عند تردده الطبيعى "Natural frequency".

ولوصف تلك الحركة نقول أنه عند وضع السكون "At rest" للبندول (البندول معلق رأسياً إلى أسفل ولا يتحرك) أى فى وضع الصفر (٠). وحركة البندول إلى يمين وضع الصفر سوف نعتبره موجب (+) وحركته إلى يسار وضع الصفر سوف نعتبره سالب (-).



٢-٢- الكميات الفيزيائية للحركة الإهتزازية

ويرتبط بالحركة الإهتزازية بعض الكميات الفيزيائية الضرورية وفيما يلى تعريف كل منها:-

٢-٢-١- سعة الإهتزاز (x) Amplitude

والسعه هى البعد من وضع السكون "position" (وضع الصفر) "at rest " أو هى أقصى إزاحة للجسم المهتز أو هى المسافة بين نقطتين فى مسار حركته تكون سرعته فى إحداهما أقصاها وفى الأخرى معدومة.

والسعه نادراً ما تستخدم فى قياس الإهتزازات وإذا إستخدم أحد الأشخاص مؤشر ذو قرص مدرج "Dial indicator" لقياس حركة العمود "Shaft" فإنه يقول إن العمود تحرك بمقدار ١/٤ بوصة ونادراً ما يقول إن العمود تحرك للخلف أو الأمام بمقدار ١/٤ بوصة.

وتقاس السعه فى النظام المترى بالملليمتر (mm) أو الميكرون (ميكرون = ١٠ $^{-٦}$ متر) وفى النظام الإنجليزى تقاس بالملز (mils) (واحد ملز = ٠.٠٠١ بوصة).

٢-٢-٢- الإزاحة (d) Displacement

والإزاحة هى الحركة الكلية للكتلة "The total movement of the mass" أو هى بعد الجسم المهتز فى أى لحظه عن موضع سكونه أو إتزانه الأصلى أو هى المشوار الذى يقطعه الجسم أثناء حركته ويطلق عليها أيضاً ضعف السعه "Double amplitude" وتساوى d = x2 أو الإزاحة من القمة إلى القمة "Peak -to- peak displacement" وتقاس الإزاحة فى النظام المترى بالملليمتر (mm) وفى النظام الإنجليزى بالملز (mils).

قياس الإزاحة مهم جداً لأنه يتناسب مع مقدار الإجهاد "stress" فى رولمان البللى، مسامير التربيط "hold-down". وفى حالة التربينات وبللى السبائك "journal bearings" الخاص بها وقياس الإزاحة تدلنا على موضع "located" العمود داخل رولمان البللى اذا كان يحتك "rubbing" على سبيل المثال.

٢-٢-٣- السرعة (v) Velocity

هى معدل تغير الإزاحة بالنسبة للزمن " The measure of change position during unit time" أو هى سرعة الجسم عندما يبدأ من سكون ويرجع فى النهاية إلى حالة السكون وسرعة البندول تساوى صفر عند أقصى نقطة فى الإتجاه السالب (-) وأقصى سرعة عند نقطة الصفر (٠) وتقل تدريجياً إلى أن تصل عند أقصى نقطه فى الإتجاه الموجب (+).

ووحدة السرعة بالنظام المترى مم/ث (mm/sec) أوسم/ث (cm/sec) وفى النظام الإنجليزى بوصه/ثانيه (inches/second).

السرعة مهمة لأنها تتناسب مع قوى الإجهاد "fatiguing forces" فى رولمان البللى والأجزاء الإنشائية "structural" الأخرى وهى السبب الأكثر شيوعاً لأعطال الماكينات الدوارة.

معظم قياسات الإهتزازات يتم أخذها بوحدة السرعة.

٢-٢-٤- العجلة (a) Acceleration

وهى معدل تغير السرعة بالنسبة للزمن "Change in velocity in unit time" وتكون أقصى عجله للبندول عندما يتحرك فى إتجاه النقطة صفر (٠) فى كل من الإتجاهين الموجب (+) والسالب (-) ووحدة العجلة جيز (g's) فى كل من النظامين المترى والإنجليزى (حيث g هى عجلة الجاذبية الأرضية وتساوى (g =9.8 m/sec or 32 ft/sec).

العجلة مهمة لأنها تتناسب مع القوى داخل رولمان البللى. كما سنرى فى قسم القياسات.

والعجلة (G) هى الأكثر أهمية مع الماكينات ذو السرعات العالية، أو الترددات العالية (>١٢٠،٠٠٠ CPM) بينما الإزاحة ممكن أن تكون صغيرة جداً، والسرعة وسط بينهما، ومستوى "levels" العجلة ممكن أن يكون مرتفع.

٢-٢-٥- الإهتزازه الكاملة "Complete Cycles"

هى الحركة التى يعملها الجسم المهتز فى الفترة الزمنية التى تمضى بين مروره بنقطه واحدة فى مسار حركته مرتين متتاليتين فى إتجاه واحد.

١- الزمن الدورى (T)

هو الزمن الذى يستغرقه الجسم المهتز فى عمل إهتزازه كاملة أو هو الزمن الذى يستغرقه الجسم المهتز ليمر بنقطة واحدة فى مسار حركته مرتين متتاليتين فى إتجاه واحد.

٢- التردد (F) Frequency

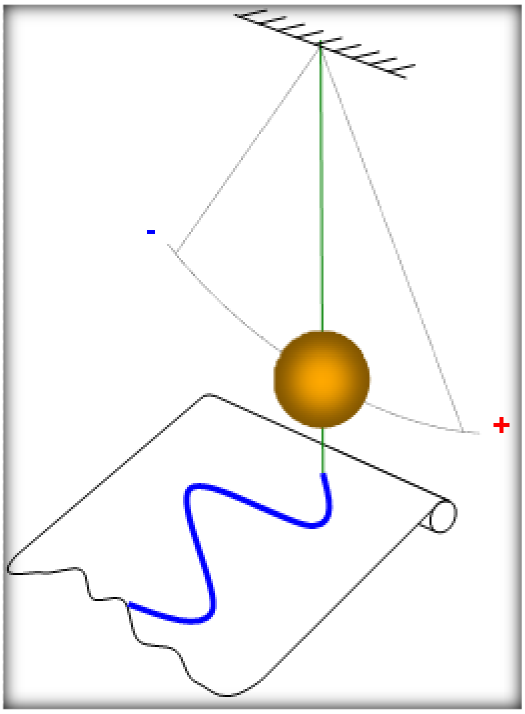
هو حدث يكرر نفسه خلال فترة زمنية معينة. أو هو عدد الإهتزازات الكاملة التى يحدثها الجسم المهتز فى الثانية الواحدة "Number of complete cycles in unit time" التردد = ١/الزمن الدورى.

وتردد الإهتزازات يقاس بالسيكل/ثانيه (cycles/second) أوبالسيكل/دقيقه (CPM) الهيرتز (Hertz) فى النظامين المترى والإنجليزى.

والنظام المهتز "Vibration system" هو نظام متزن "Equilibrium" يجمع بين البارامترات الفيزيائية الآتية فى وقت واحد (السعه - السرعة - العجلة - التردد).

٢-٣- الموجة الجيبية الناتجة من حركة البندول "Sine Wave Plot"

نتخيل أن البندول (كل من الكتلة والخيط الذى يحمل الكتلة والذى لاوزن له) من الزجاج النظيف الشفاف والذى لا نستطيع رؤيته واذا دهنا نقطة سوداء أسفل الكتلة وجعلنا مستوى النظر بمحازاة النقطة السوداء وقمنا بسحب البندول "pull" الى الخلف "back" وتركة "release" سترى النقطة السوداء تتحرك للخلف والامام فى خط مستقيم والآن نتخيل بأننا ثبتنا لولب به قلم "spring-loaded pen" أسفل البندول الزجاجى "glass" وتحت القلم نضع لفة ورق "roll of paper" بحيث يمس القلم الورق واذا سحبنا البندول الى الخلف وتركناه وفى نفس الوقت نسحب الورق بمعدل ثابت فإن المنحى الناتج من حركة البندول والمرسوم على الورق يظهر أن الإهتزازات تتغير بمرور الوقت كما هومبين بالشكل رقم ١ التالى.



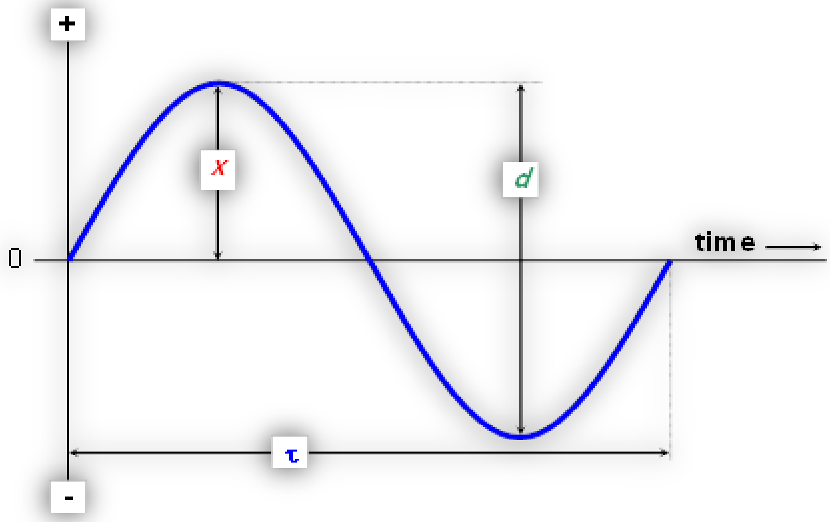
شكل رقم ١

وهذا الشكل يسمى منحنى المخطط الزمني للحركة "time domain plot"، لأنه يوضح كيف أن الإهتزازات تتغير مع مرور الوقت. وإذا إفترضنا أن المحور الإفقى (x) يمثل خط الصفر والإتجاه الموجب "+" فوق خط الصفر والإتجاه السالب "–" أسفل خط الصفر.

وجميع المصطلحات المعرفة والواردة فى مناقشتنا السابقة لحركة البندول كلها موجودة فى شكل رقم ٢ الآتى ويسمى أيضاً المنحنى الزمنى "time domain plot":-

(x) هى سعة الإهتزازة "amplitude" وهي أقصى إزاحة يصل إليها الجسم المهتز من موضع الاتزان (السكون) أو المسافة من خط الصفر.

(d) هى الإذاحة "displacement" وهى الحركة الكلية للكتلة أو هي بعد الجسم المهتز في أية لحظة عن موضع إتزانه أوسكونه (ضعف القمة "peak" أو من القمة للقمة "peak to peak").



شكل رقم ٢ – الموجة الجيبية

وبمقارنة الشكلين (١و ٢) لحركة البندول يمكننا أن نرى الآتى:-

١- عندما يكون البندول فى وضع أقصى اليمين يكون المنحنى فى أعلى نقطة فى الإتجاه الموجب "+".

٢- عندما يكون البندول فى وضع أقصى اليسار يكون المنحنى فى أدنى نقطة فى الإتجاه السالب "–".

٣- المحور س "x" يمثل الوقت لأن الورقة سحبت للخارج بمعدل ثابت.

٤- فترة الموجة يمثل بالحرف الإغريقى"τ" وينطق تاو ويعرف أيضاً بالزمن الدورى وهو الزمن ما بين حدثان متتاليان من الحركة ويتكرران بنفس الخواص وفى إتجاه واحد.

وكما بالشكل السابق (٢) الزمن بين قمتان "maximum" أى عندما تكون السعة (x) عند قيمتها القصوى الموجبة (+)، أو قاعان "minimum" عندما تكون السعة (x) عند قيمتها القصوى السالبة (–) وفى نفس الإتجاه.

وأيضاً كما بالشكل السابق يبدأ المنحنى عند الصفر "٠" أى عند (٠°) على المحور (x) فى الإتجاه الموجب (+) ويصل الى القمة عند ٩٠° ثم يصل قيمتة الى الصفر (٠) مرة أخرى عند (١٨٠°)

ولكن فى الاتجاه السالب (–) (وهذا لا يحقق شرط أنهما فى إتجاه واحد) ثم يصل المنحنى إلى القمة مرة أخرى عند (٢٧٠°) ثم يترك المنحنى القيمة (٠) عند (٣٦٠°) على المحور (x) في الإتجاه الموجب (+) وهو نفس إتجاه بداية الحركة (وهذا يحقق شرط أنهما فى إتجاه واحد). وبالتالى يكون مر الجسم المهتز بنقطة واحدة (الصفر"٠") بمسار حركتة مرتان متتاليتان وفى إتجاه واحد.

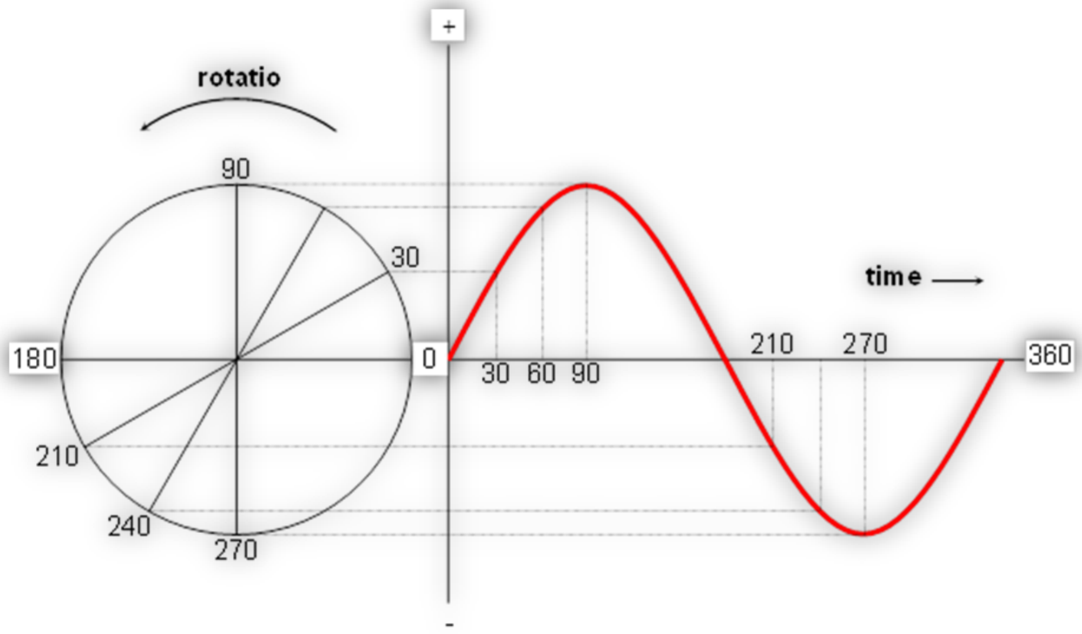
والتردد " Frequency" $f = \tau$ /1 (وهو معكوس الزمن الدورى) وهو عدد الاهتزازات الكاملة التي يعملها الجسم المهتز في الثانية الواحدة.

مثال موتور سرعتة ١٨٠٠ rpm وهى لفة واحدة لكل دقيقة، والفترة (period) تكون ١٨٠٠/١ فى الدقيقة والتردد يساوى ١/١/١٨٠٠ والذى يساوى ١٨٠٠ سيكل / دقيقة.

وعليك أن تدرك فى علم المثلثات "trigonometry" أن الأشكال ١ و ٢ تمثل خواص الدالة الجيبية وتسمى أيضاً موجة جيبية وفيها يمثل المحور س (x) الزمن، والفترة الواحدة "one period" تمثل دورة واحدة حول دائرة وتساوي ٣٦٠ درجة.

ننظر في الشكل ٣ ونتخيل ان لدينا كتلة في نهاية نصف قطر الدائرة وجاهزة للدوران حول الدائرة وفي اتجاه عكس اتجاه عقارب الساعة. وعندما تكون الكتلة فى وضع السكون (لم تتحرك) فتكون في وضع الصفر"٠". وإذا تخيلت الدائرة مثل الساعة، سترى أن الكتلة فى وضع الساعة ٣:٠٠.

وعندما تتحرك الكتلة ٣٠ درجة (one "o'clock" position) كل ثانية، سوف يستغرق ٣٦٠ درجة (أو ١٢ ثانية) لعمل لفة كاملة. عند الزمن صفر"٠" نرسم خط على طول محور "x" ونرسم وضع ٠ على محور "x" (محور x هو الزمن).



شكل رقم ٣

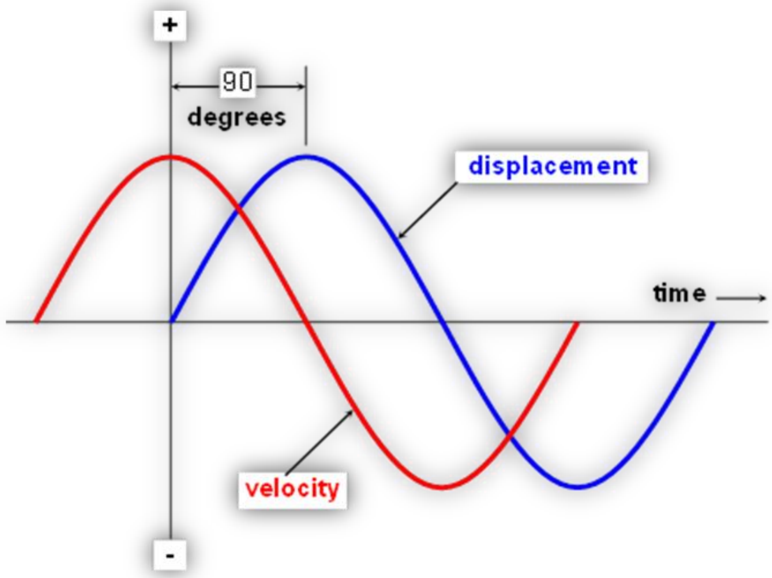
بعد ثانية واحدة تتحرك الكتلة ٣٠ درجة، وتكون مكانها عند الساعة ٢:٠٠، وبعد ثانية أخرى تتحرك الكتلة (٦٠ درجة) وتكون مكانها عند الساعة ١:٠٠ ونكرر العمل مرة أخرى لدورة كاملة وبالتالي يمكننا رسم موجة جيبية كاملة مثلها مثل حركة البندول السابقة.

نلاحظ أن محور x في شكل ٣، سمى بالدرجات بدلاً من الثواني. ومازال محور س يمثل الزمن، حتى الآن يتم قياس الوقت بالدرجات، وليس من الصعب فهم ذلك، في هذا المثال، قلنا أن الكتلة انتقلت ٣٠ درجة في كل ثانية. ومن المفيد في تحليل الاهتزاز قياس الوقت على طول محور x بالدرجات مما يجعل الحسابات أكثر سهولة.

إقترح البارون جوزيف فورييه جان بابتيست (١٧٦٨-١٨٣٠) فكره بأن حركة النظام فى حالة الإتزان تكون بموجة جيبية معقدة يمكن تمثيلها كما لو كانت مجموع موجات كثيرة جيبية مختلفة فى التردد والسعة. وعلى الرغم من أن بصمة الاهتزاز نادراً ما ينظر إليها كموجة جيبية نظيفة ونقية، ولكن إستجابة النظام للإهتزاز يمكن توضيحها باستخدام موجات جيبية.

ننظر مرة أخرى في الشكل ٢ عندما تكون السعة (x) عند قيمتها القصوى الموجبة (+)، يكون البندول فى وضع أقصى اليمين. وتكون سرعتة صفر(٠). وعندما يعود البندول إلى خط الصفر(٠) (فى الوسط) تكون إزاحتة الحالية صفر(٠) (هى الحركة الكلية للكتلة "ضعف القمة أو من القمة للقمة") وسرعتة فى أقصاها.

إذا وضعنا الرسم البيانى لمنحنى السرعة على نفس الرسم البيانى لمنحنى الإزاحة نرى ظاهرة مثيرة للإهتمام هو أن السرعة تسبق دائما الإزاحة بمقدار ٩٠ درجة إنظر الى محور الصادى (y) من شكل ٤.



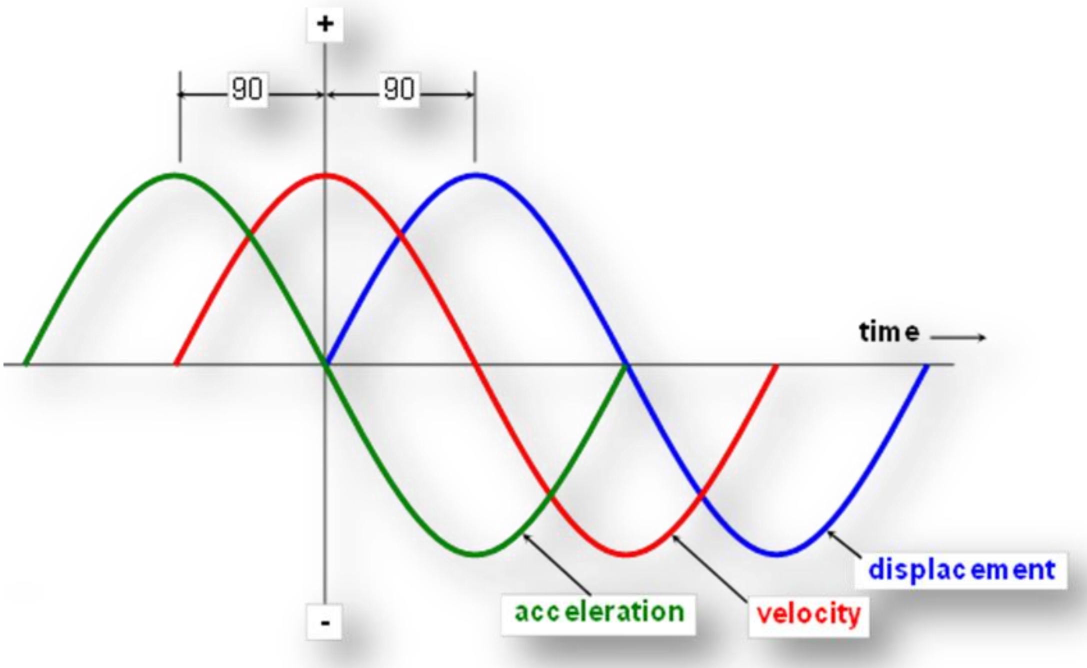
شكل رقم ٤

هنا تجد السرعة عند قيمتها العظمى ولكن الإزاحة قيمتها صفر ثم إنظر على طول الإحداثى السينى " x" بعد ٩٠ درجة تجد أن الإزاحة فى قيمتها القصوى والسرعة تكون صفراً.

عندما يتحرك البندول في اتجاه الصفر من موضع أقصى اليسار تزداد سرعتة، ويصل إلى أقصى سرعة عندما يمر خلال الصفر لخط الإزاحة. تعرف العجلة بأنها التغيير في السرعة في وحدة الزمن.

المنحنيان الإثنين في الشكل ٤ (السرعة والإزاحة) ليس بهما منحنى العجلة، وكلما زادت السرعة كلما إقتربت الإزاحة الى الصفر (وتنخفض مع زيادة الإزاحة). لمشاهدة ذلك، إختار نقطة على طول المحور السينى.

أرسم خط عمودي على تلك النقطة بحيث يقطع خطوط كل من الإزاحة والسرعة في هذه اللحظة وعند هذا الوقت. كرر العمل السابق الى نقط أخرى تالية وحدد النقط على المنحنيان. ستلاحظ أنه إذا زادت قيمة الإزاحة إنخفضت قيمة السرعة.



شكل رقم ٥

وبالمثل، إذا إنخفضت قيمة الإزاحة إرتفعت قيمة السرعة. عندما يمر البندول عبر خط الصفر خلال حركته الى موضع أقصى اليمين فإنه يتباطؤ في سرعتة "decelerates" ويسرع "accelerates" "يتعجل" كلما عاد البندول إلى خط الصفر من موضع أقصى اليمين. أى أن البندول يسرع "يتعجل" موجباً (فى إتجاه الجانب الموجب لخط الصفر) عندما يكون بالجانب السالب.

وبالمثل البندول يسرع (يتعجل) سلباً (نحو الجانب السالب) عندما يكون بالجانب الموجب. بالنظر إلى البندول مرة أخرى ، نرى أن من موضع أقصى اليسار البندول يسرع "accelerates" موجباً فى إتجاه نقطة الصفر (٠).

إذا أضفنا منحنى العجلة إلى منحنيات الإزاحة والسرعة، فإننا نحصل على الرسم البياني كما هو مبين في الشكل ٥.

الرسم في الشكل ٥ يبين أن العجلة "acceleration" هى عكس الإزاحة "displacement" مباشرةً، وأن العجلة "acceleration" تسبق السرعة "velocity" ب ٩٠ درجة (والإزاحة ب ١٨٠ درجة).

٢-٤- زاوية الطور "phase"

هذه العلاقة بين الإزاحة والسرعة والعجلة تعطينا مصطلح جديد وجه أو طور "phase" ويرمز له بالحرف اليوناني فاي "ϕ".

والطور هي العلاقة الزمنية بين حدثين ذات الصلة، ويعبر عنه بالدرجة. عند حدوث حدثين في نفس الوقت المحدد يقال أنهما متفقان فى الطور "in phase" والأحداث التي لا تحدث في نفس الوقت هي مختلفة فى الطور "out of phase"، والوقت الفاصل بينهم (يقاس بالدرجة) وتكون هى زاوية الوجه أو الطور "phase angle".

على سبيل المثال الإزاحة "displacement" والسرعة "velocity" مختلفان فى الطور ب ٩٠ درجة "out of phase"، أو أن فرق زاوية الطور ٩٠ درجة "phase angle".

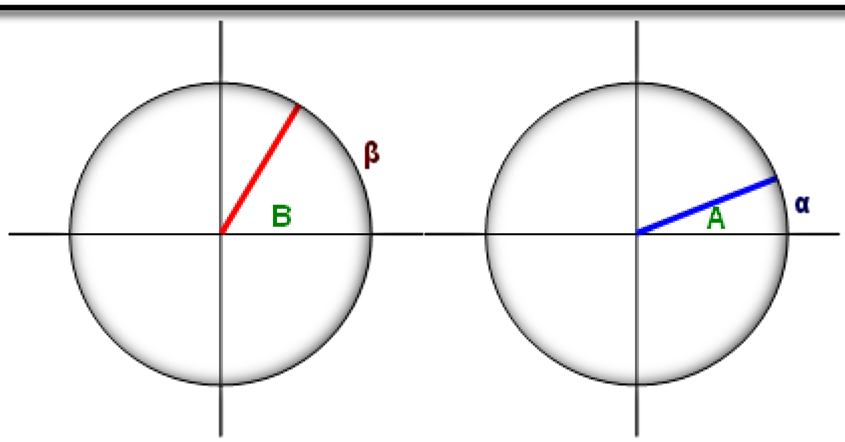
الطور "Phase" يعطينا مصطلح آخر لوصف الحركة الاهتزازية وهو التردد الدائرى " circular frequency".

٢-٥- التردد الدائرى (ω)

مقياس كمية الدورات أواللفات في وحدة الزمن ويرمز له بالحرف اليوناني ω "أوميغا" ويساوى $2*\pi*f$ والتردد الدائري يقاس راديان/ثانية (radians/second) في النظامين الإنجليزى والمترى.

والراديان "radian" هو المقياس الزاوي الذى كثيراً ما يستخدم بدلاً من الدرجات "degrees" وهو الزاوية التى طول قوسها على محيط الدائرة يساوى نصف قطر الدائرة ويبين شكل ٦ دائرتين متساويتين فى نصف قطرهما على محورى x,y.

1 full circle = 360 degrees = 2π radians



شكل رقم ٦

زاوية (A) يتم رسمها بواسطة إثنان من أنصاف الأقطار "radin" من مركز الدائرة الى حافتها.

القوس يتم عمله بواسطة إثنين من أنصاف الأقطار تسمى (α) لها طول معين وإذا قطعنا (α) خارج الدائرة وفردناها يمكن إستخدام مسطرة لقياس طول القوس.

ننظر الآن للزاوية B وهو القوس المقطوع بإثنين من أنصاف الأقطار (يسمىβ) وهو أطول بكثير من القوس (α).

وفي الواقع إذا قسنا الطول β سوف نجد أنه نفس نصف قطر الدائرة بالضبط وهذه الزاوية B تساوي واحد راديان و ١ راديان يساوي تقريباً ٥٧ درجة.

إذا كانت الدائرة ٣٦٠ درجة ماهو عدد الراديان بها؟ تذكر أن محيط الدائرة يساوي ٢*π*r (r = نصف قطر الدائرة).

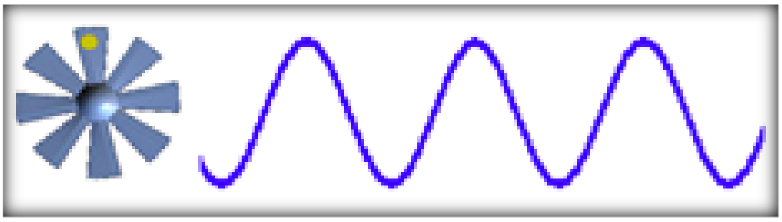
زاوية الواحد راديان تقطع قوس متساوي في الطول لنصف القطر ويوجد ٢π لتلك الأقواس في الدائرة.

ولذلك ويوجد ٢π راديان في الدائرة الواحدة.

القسم الثاني:- الشكل الموجي وبصمة الإهتزازات وقياس الإهتزازات

١- الشكل الموجي "time waveform"

المنحنى الناتج من حركة المروحة بسرعة ثابتة بعد وضع الكتلة (العملة) عبارة عن موجة جيبية "sine wave". والذروة "peak" للموجة الجيبية "sine wave" تحدث عندما تكون العملة "coin" فى الجزء العلوى "top" أو عندما تكون العملة فى القاع "bottom".



هذا هو مايحدث بالضبط عندما يكون لديك لاقط إهتزاز "vibration sensor" (جهاز إستشعار) على المروحة ونظرت إلى إشارة الإهتزازات من على شاشة جهاز جامع الإهتزازات " analyzer screen".

الموجة الجيبية "sine wave" التى تراها تمثل كيفية تغير الإهتزازات لحظياً "instantaneous" مع الزمن "over time" والشكل الموجي"waveform" هو جزء لايتجزأ من رصد وتحليل الإهتزازات "vibration monitoring" سوف نرى كيف سيتغير الشكل الموجي "waveform" مع تغير سرعة المروحة، وكذلك عندما يتم إضافة مصادر أخرى للاهتزاز "other sources".

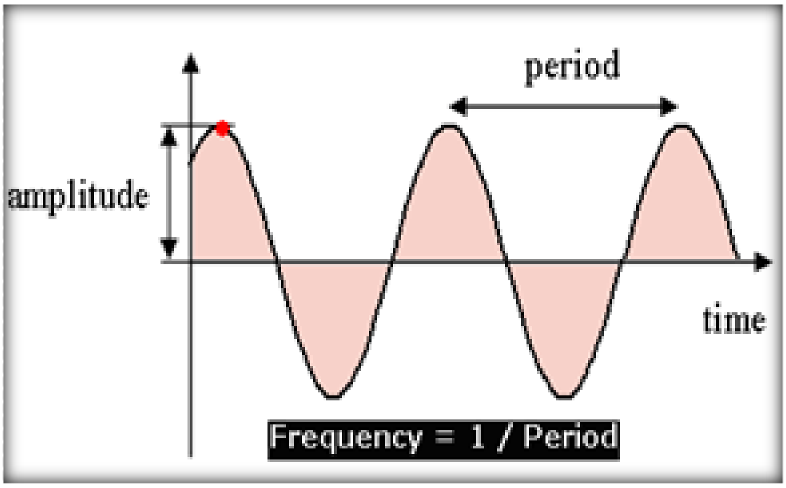
١-١- المفاهيم والمصطلحات الخاصة بالشكل الموجي

١-١-١- تعريف الفترة "period" والتردد "frequency"

هذا هو الوقت المناسب لكى نتعلم مصطلحين "terms" لهم أهمية كبيرة.

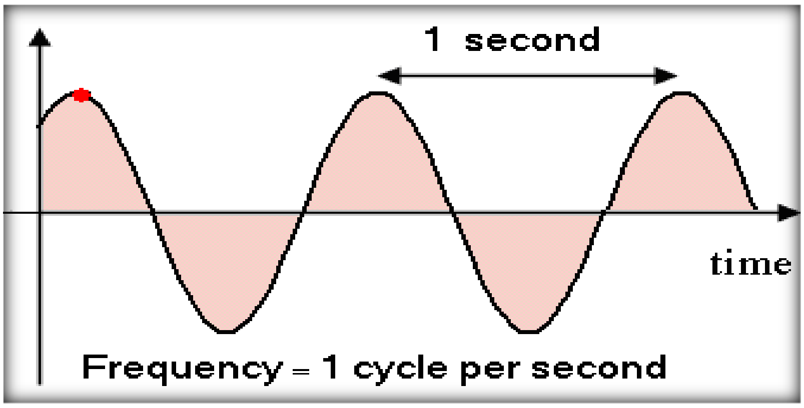
المصطلح الأول هو الفترة "period" إذا قست الزمن بين إثنين من القمم "two peaks" هذا الزمن هو الفترة للشكل الموجي.

والمصطلح الثانى هوالتردد "frequency" و هو معكوس "inverse" الفترة.

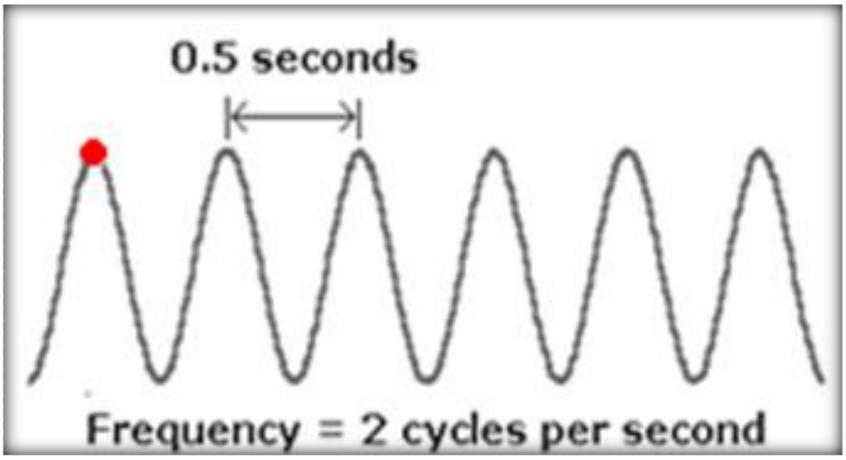


فى هذا المثال المروحة تدور لفة لكل ثانية، لذلك تصبح الفترة الزمنية "period" ثانية واحدة والمعكوس وهو التردد هو أيضاً يكون واحد (١).

أى أن التردد يكون قيمة واحد لفة فى الثانية الواحدة "cycle per second".



وإذا ضاعفنا سرعة المروحة وكررنا العمل السابق، فإننا سنرى أن الموجات سوف تتزاحم معاً كما بالشكل التالى.



الزمن بين الموجات أى الفترة أصبحت (٠.٥ seconds) بسبب أن المدة أخذت نصف الزمن لمروحة تدور لفة واحدة. والتردد يساوى (٠.٥/١) أو (٢) لفة لكل ثانية.

١-١-٢- تعريف "CPM" "اللفات لكل دقيقة"

عادة ما يعرف التردد "frequency" بأنه عدد اللفات لكل دقيقة "CPM" أو عدد اللفات لكل ثانية "CPS".

ومن المعروف أن (سرعة الدوران CPM = CPS*٦٠).

١-١-٣- تعريف التردد "Hz"

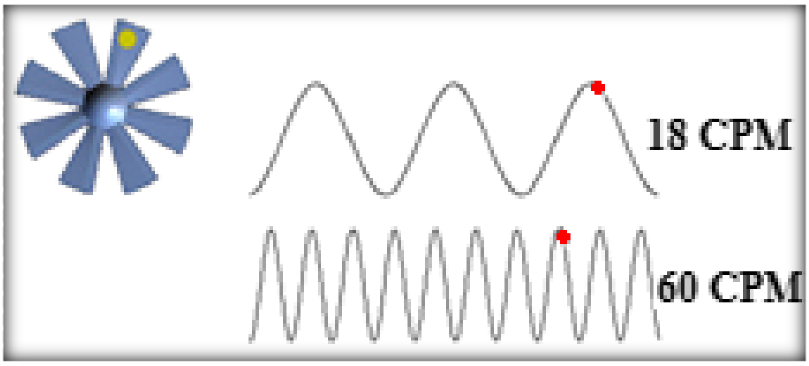
عادةً ما نعرف التردد بأنه عدد اللفات فى الثانية الواحدة وهى أسهل للفهم، ويستخدام مصطلح هيرتز "Hz" للتعبير عنه. أى أن العمود "shaft" يدور "turning" عند ٢ هيرتز (سرعة المروحة هى ١٢٠ سيكل/الدقيقة).

١-١-٤- تعريف وحدة الدوران لكل دقيقة "RPM"

يوجد مصطلحان يستخدمان لوصف أى تردد هما "CPM" و "Hz" مثلاً تردد الصفارة "whistle" وتردد صندوق التروس "gearbox". ولكن عندما نتكلم عن سرعة دوران العمود أو سرعة المواتير أو الماكينة، فإننا نستخدم وحدة الدوران لكل دقيقة (RPM) (أى أن سرعة دوران عمود المروحة تساوى ٢*RPM).

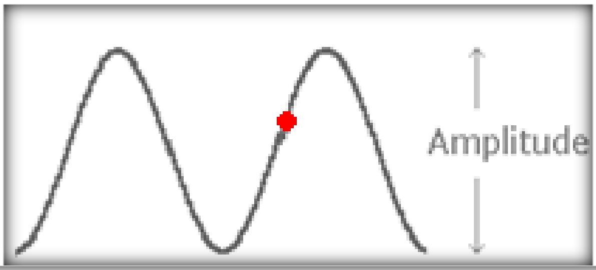
١-٢- تأثير السرعة على الشكل الموجى

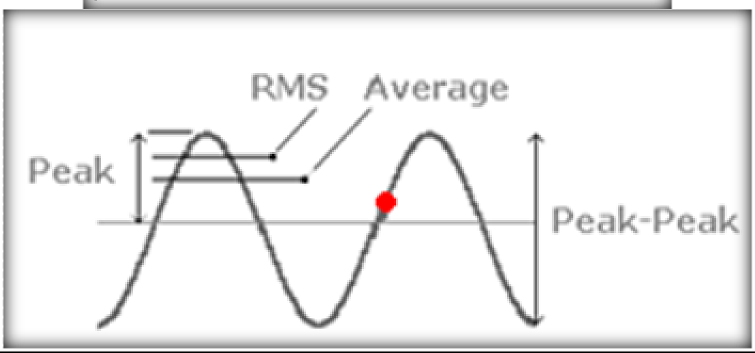
دعونا ندرس تأثير السرعة على الشكل الموجى. كلما زادت السرعة "speed" يزداد التردد "frequency" والفترة الزمنية تقل "period" – لذا تكون الدورات "cycles" للشكل الموجى "waveform" قريبة من بعضها البعض.



١-٣- إختيار نوع السعة "amplitude"

السعة تخبرنا بشدة الإهتزازات "severity". والسعة تساوى إرتفاع أو قمة "pk" الدورات "cycles". وإذا ضاعفنا الوزن على ريشة المروحة لزيادة عدم الإتزان وأعدنا نفس الرسم البيانى السابق بنفس مقياس الرسم "scale" فإن إرتفاع الرسم البيانى سيكون أكبر من ذلك بكثير نظراً لزيادة شدة الإهتزازات.





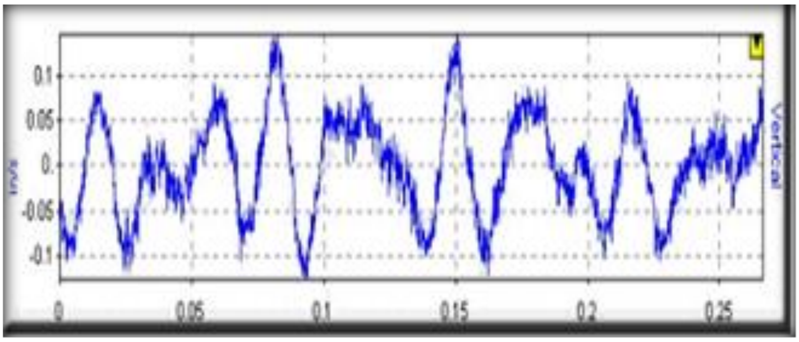
وتوصف سعة الإهتزازات للشكل الموجى بالمصطلحات الأتية .

١-٣-١- تعريف القمة إلى القمة "peak-to-peak"

عندما ننظر إلى السعة فى عالم الإهتزازات فإننا فى الواقع نعرف بعض المصطلحات الجديدة. السعة من القمة إلى القمة وتختصر إلى "pk-pk" وهى مقدار السعة المقاسة من قاع "pk" الموجة "bottom" إلى قمة "pk" الموجة "top".

فى الموجة الجيبية "sine wave" التى لدينا قيمة القمة إلى القمة "peak-peak" هى بالضبط ضعف قيمة القمة "peak" ولكن هذا ينطبق فقط على الموجة الجيبية النقية "sine wave".

ولكن عملياً إشارة الإهزازات الحقيقية "real signal" قد تكون القيمة المطلقة القصوى "maximum value" أكبر أو أقل من القيمة المطلقة الصغرى "minimum value" كما هو فى الشكل التالى.

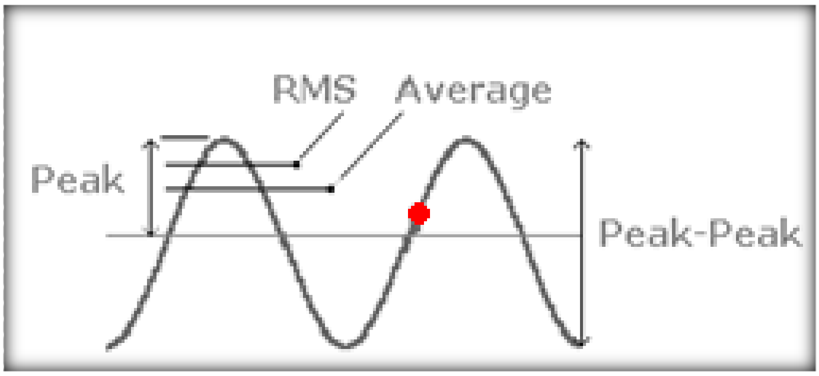


١-٣-٢- تعريف القمة "peak"

القمة "peak" وتختصر إلى "pk" وتحسب قيمة السعة "amplitude" المقاسة من وضع السكون(٠) إلى القمة "peak" أى من الصفر إلى القمة أو من الصفر إلى القاع "pk" كما هو واضح فى الرسم البيانى.

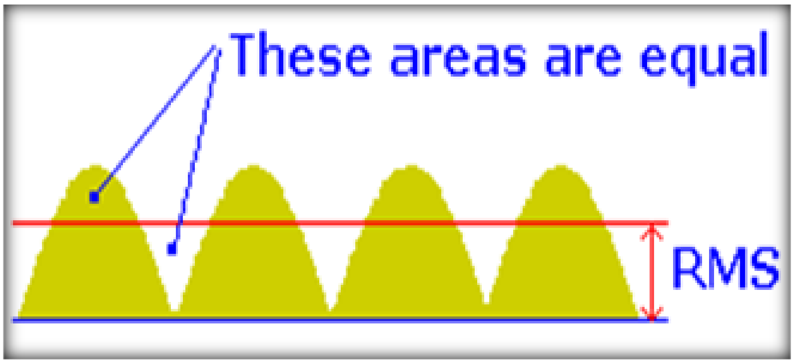
١-٣-٣- تعريف القيمة المتوسطة "average"

القيمة المتوسطة "average value" للإشارة "signal" هى مصطلح يستخدم نادراً. وهى متوسط القيمة المطلقة للشكل الموجى "waveform". وفى الموجة الجيبية "sine wave" تساوى نصف قيمة القمة "peak".

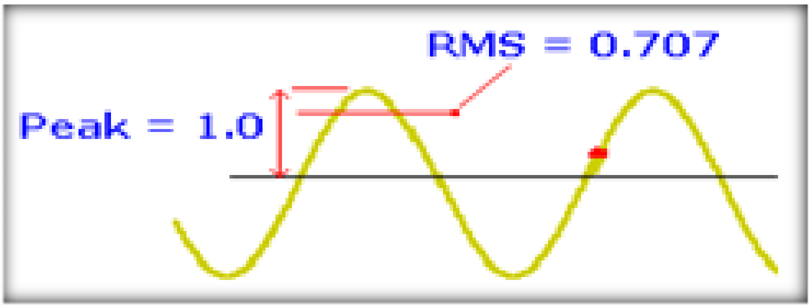


١-٣-٤- تعريف قيمة مربع الجذر التربيع "rms"

المصطلح التالى هو "rms". هو الجذر التربيعى لمتوسط القيم المربعة للشكل الموجى "waveform". وفى حالة الموجة الجيبية "sine wave"، متوسط الجزر التربيعى للسعة "RMS" = Peak Value × .7070، ولكن هذا صحيح فقط فى حالة الموجة الجيبية النقية.

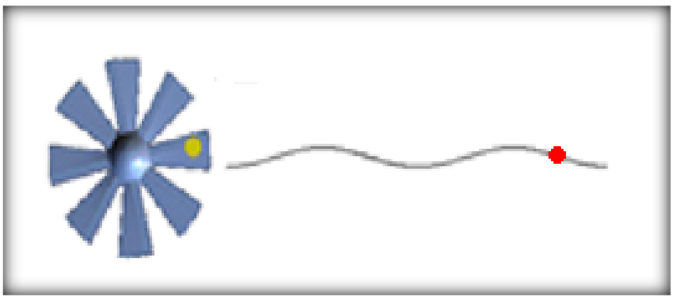


قيمة "rms" تتناسب مع المنطقة تحت المنحنى "under the curve" – وإذا تم تصحيح "rectified" القمة السالبة "negative peaks" أى جعلها موجبة. والمتوسط الناتج من المنطقة تحت المنحنى تعطى مستوى ثابت "constant level" وهذا المستوى الثابت يكون متناسباً مع قيمة "rms".

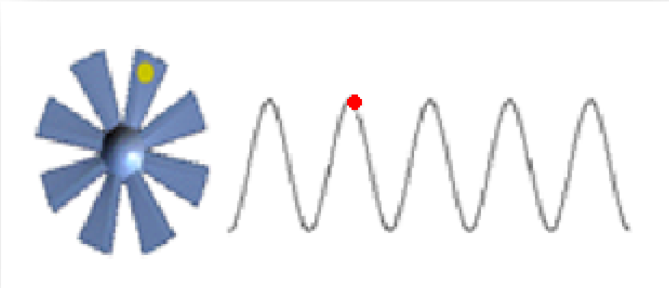


١-٣-٥- العلاقة بين كل من مربع الجزر التربيعى "rms" والقمة "peak" والقمة إلى القمة "peak-peak"

حاول تغيير السرعة ولاحظ ماذا يحدث. ونلاحظ فى المثال التالى عندما كانت السرعة (12 cpm) كانت قيمة pk-pk تساوى (٢) وpk تساوى (١) وrms تساوى (٠.٧٠٧ من القمة) وكانت السعة قليلة كما بالشكل التالى:-



وبزيادة السرعة إلى مثلاً (٣٠ cpm) كانت قيمة pk-pk تساوى (١٢.٥) و pk تساوى (٦.٢٥) وrms تساوى (٤.٤١) وزادت السعة كما بالشكل التالى:-



١-٣-٦- أهمية إختيار نوع سعة الإهتزازات

المفاهيم السابقة مهمة جدا، فالمصطلحات "peak" و"rms" ليست عبارات مجردة فقط لوصف الشكل الموجى "waveforms". ولسنوات عديدة كان الناس تستخدم عدادات قياس "hand held meters" التى تعطى قياس شامل لمستوى الإهتزازات على الماكينات "overall". والقراءات عادة ماتكون بإستخدام مستوى الإهتزازات rms أو peak أوpeak-peak.

هذه القياسات لا تزال مهمة لليوم. ومعظم نظم مراقبة الحالة "condition monitoring" توفر خيارات مختلفة لقراءة RMS بحيث تمكنا من عمل منحنى الإطراد لمتابعة الحالة "trend".

وقيمة RMS يتم حسابها إما من الشكل الموجى "waveform" أو البصمة "spectrum"، أو من خلال شريحة "chip" فى جهاز جامع الإهتزازات التى تستمد قيمة مستوى rms من الإشارة الديناميكية.

هناك معايير لقياس شدة الإهتزازات لمعرفة الحدود المسموحة للإهتزازات وتحديد الماكينات السيئة وتعتمد أساساً على مستوى rms. وينطبق الشئ نفسه على قراءات "peak" على " journal bearing" للماكينة، وتعد مؤشراً على مدى حركة العمود داخل الجلبة.

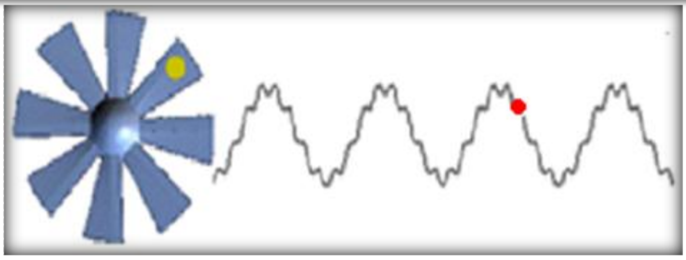
١-٤- الشكل الموجى "Waveform" يمكن أن يكون معقداً جداً

حتى الآن كانت إشارة الإهتزازات بسيطة جداً. مجرد مروحة غير متزنة "out of balance". والشكل الموجى بسيط جداً "waveform".

الشكل الموجي يمكن أن يكون معقداً جداً. ويوجد مصادر متعددة لإهتزازات الماكينة. مثل رولمان البللى، ريش مراوح التبريد، بارات محرك الدوران "rotor bars"، والرنين كلها تولد إهتزازات على ترددات مختلفة.

وقد حان الوقت الآن لجعل الأمور أكثر تعقيداً بإدخال تردد جديد إلى الشكل الموجى وهو تردد ريش المروحة.

وإذا وضعنا كارت من الورق المقوى ولصقناه على المروحة مابين الريش "playing card" بحيث يضرب ريش المروحة أثناء دورانها وبالتالى سوف يتغير شكل الإهتزازات "vibration pattern" نتيجة إدخال تأثير ريش المروحة (عدد ٨ ريشة) بالإضافة لعدم الإتزان.



أى أنه بالإضافة إلى الإهتزازات الناتجة من عدم الإتزان فإننا نسمع صوت نقر "flicking" عند كل لفة تدورها المروحة وذلك نتيجة إدخال تردد ريش المروحة إلى الشكل الموجى. وسوف تسمع نقر لعدد ٨ ريش (طبعاً لوكانت هناك وسيلة لذلك).

هناك عدد من الأشياء يمكن أن نتعلمها من ذلك. أولاً ستلاحظ أن شكل الموجة مختلف عن ذى قبل وأصبح به تموجات "ripple" راكبة "superimposed" على الموجة الجيبية المهيمنة الأصلية "sine wave".

وتردد التموجات "ripple" يساوى ٨ مرات تردد سرعة الدوران للمروحة فمثلاً إذا كانت سرعة الدوران (RPM٢٤).

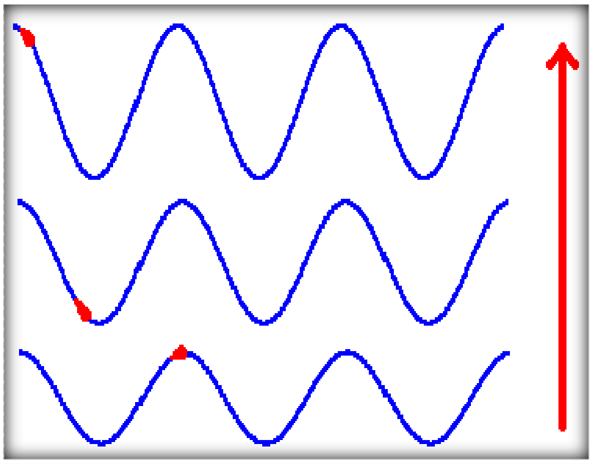
فيكون تردد التموجات "ripple frequency" يساوى (CPM١٩٢ = RPM٨ * blades).

ونلاحظ أيضاً أن قيم (RMS, Peak و Pk-Pk) سوف تختلف الآن وذلك لأن الإشارة الآن مزيج من إشارتين.

ومن خلال المثالين الآتيين يمكنك ملاحظة التغير فى الشكل الموجى بزيادة مقدار عدم الإتزان وزيادة مقدار الإحتكاك.

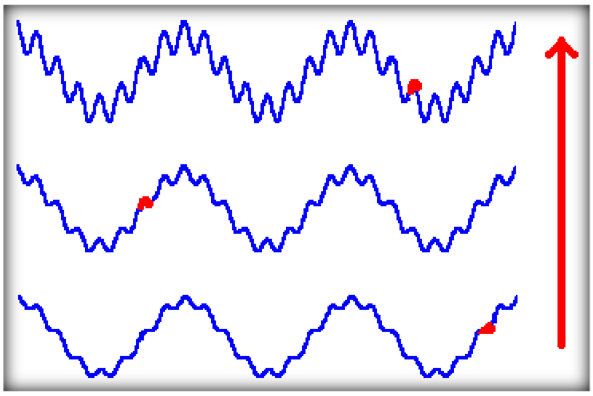
١-٤-١- زيادة عدم الإتزان "Increase out-of-balance"

تخيل لو إلتقط الشكل الموجى "time waveform" من على المروحة أسبوعياً. وبالنظر إلى كل الشكل الموجى تلاحظ أن التردد هو نفس تردد سرعة تشغيل المروحة، ولكن مستوى الإهتزازات هى التى إزدادت أعلى و أعلى. وكأن شخص ما قد زاد ببطئ حجم العملة "coin" على إحدى الريش لإجبارها على مزيد من عدم الإتزان.



١-٤-٢- زيادة الإحتكاك "rub"

مستوى إشارة الإهتزازات لم تتغير، ولكن الإهتزازات بسبب المروحة زادت بالفعل. ويمكننا ملاحظة أن إشارة الإهتزازات الرئيسية لم تتغير، ولكن ظهر تأثير الترددات العالية فقط وكأن إحتكاكات المروحة "rubbing" تزداد أكثر وأكثر كلما إحتكت بالكارد.



الخلاصة:-

هذه هى البيانات الأساسية "basic data" التى تساعدك على تحليل الإهتزازات، الآن أصبحت معتاداً على تلك الإشارات "signals"، ويمكنك أن تشخص أى مشكلة مع تلك المرواح ويمكنك فعل ذلك لأنك لمست تغير فى مستوى الإهتزازات وكذلك شكل البصمة "vibration pattern".

وتحليل الاهتزاز هو فن المراقبة "art of watching" والبحث عن التغير فى أنماط الإهتزازات، ويرجع مردود تلك التغييرات إلى التصميم الميكانيكى للماكينة، وهذا هو أساس تحليل الإهتزازات.

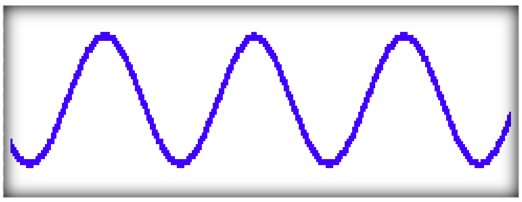
٢- بصمة الإهتزازات "spectrum"

مقدمه:-

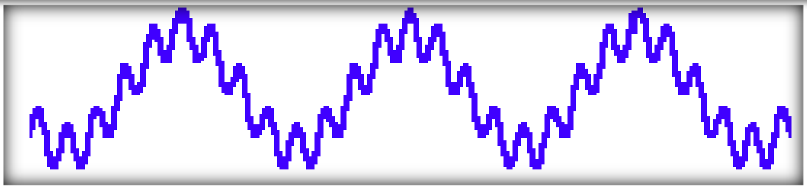
الشكل الموجى "time waveform" مفيد جداً فى تحليل الإهتزازات. لأنها تتيح لنا أن نرى بالضبط كيف يمكن للإهتزازات أن تتغير من لحظةٍ إلى أخرى. إذا كان هناك صدمات "impact" (كل كرات رولمان البللى تصطدم "striking" بالشروخ "crack" فى الجلبة الداخلية لرولمان البللى "inner race") فيكون من المتوقع أن نرى "impact" فى الشكل الموجى.

٢-١- تأثير كل من عدم الإتزان وإحتكاك الريش فى الشكل الموجى

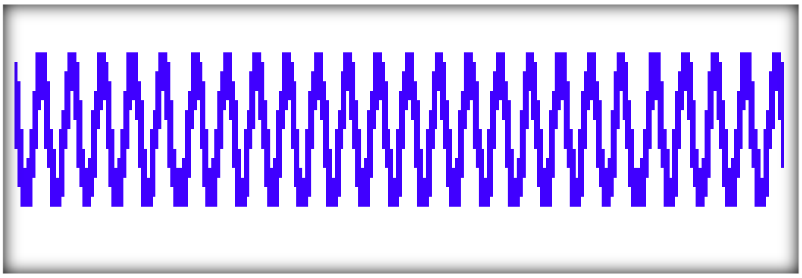
ونحن نعلم أن هناك إشارة واحدة وهى إشارة عدم الإتزان فى الشكل الموجى الذى هو عبارة عن موجة جيبية نقية عند سرعة تشغيل المروحة.



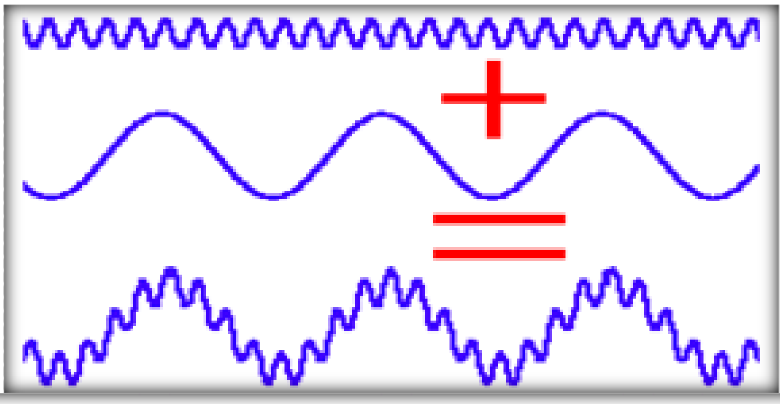
ولكن بإدخال تأثير تردد ريشة المروحة إلى تأثير عدم الإتزان يحدث تغيير للشكل الموجى كالآتى.

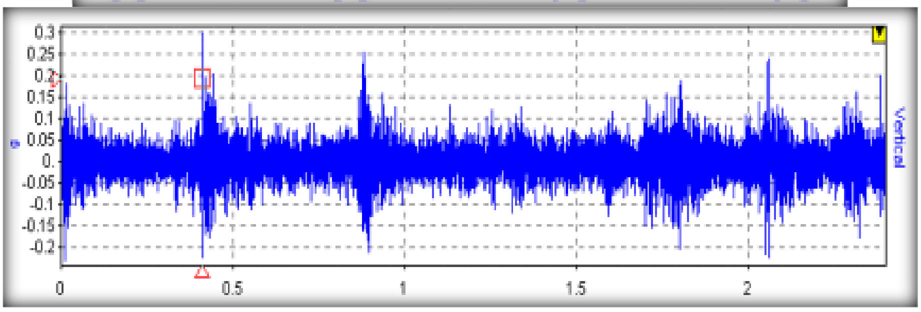


ما رأيك لو تم إزالة الكتلة الموضوعة على إحدى ريش المروحة ولكن مازلنا نحصل على الإهتزازات من ضربات الريش "blades striking" (والتى تحدث عند ٨ مرات من سرعة الدوران).



والآن يمكننا أن نرى إضافة تأثير كل من كتلة عدم الإتزان و ريش المروحة. وفى الواقع يمكننا إضافة إشارات وما نحصل عليه يعتمد على التردد، والسعة وزاوية الطور "phase" لكلا الإشارتين

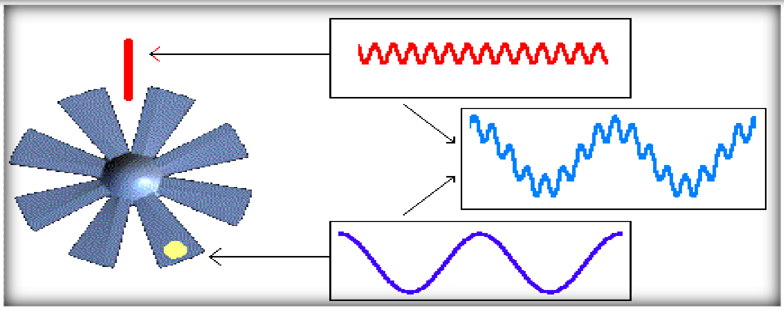




الشكل الموجى مفيد جداً، ولكن مع المزيد والمزيد من مصادر الإشارات يصبح من أكثر صعوبة لتفسير ما يحدث للماكينة. ولكن مع حالتنا البسيطة يمكن أن نرى إثنان من الإشارات مختلفان فى التردد والسعة.

٢–٢ ربط شكل الإهتزازات "vibration pattern" بما يحدث بالماكينة

وفى أذهاننا ونحن نستخرج تلك المعلومات أن نربط نمط الإهتزازات "vibration pattern" إلى مايحدث للماكينة كما بالشكل الآتى:



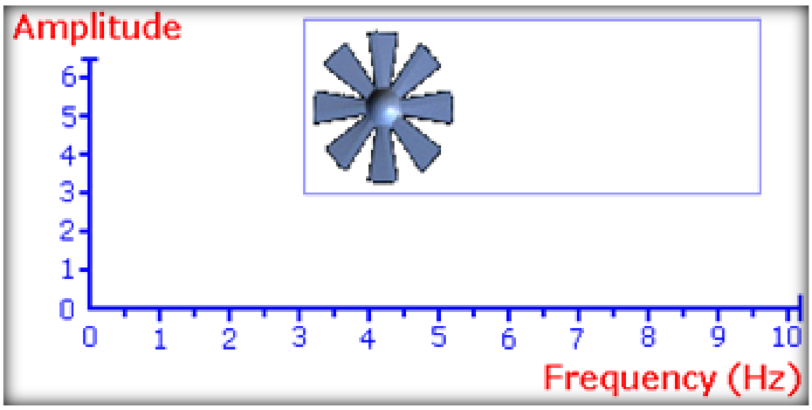
٢-٣- بصمة الإهتزازات عبارة عن تردد وسعة

ولكن يوجد طريقة أخرى تمكننا من دراسة الإهتزازات، وهى بصمة المعدة "spectrum". وهذه البصمة مشتقة من الشكل الموجى "waveform" من خلال عملية تسمى تحويل فوريبه السريع أو FFT.

دعونا نبني رسم بياني آخر. هذه المرة، المحور الإفقي (المحور السينى) يمثل التردد بدلاً من الزمن. تذكر، أن كلما دارت الماكينة أسرع كلما إرتفع التردد. والمحور الرأسى (المحور الصادى) يمثل السعة.

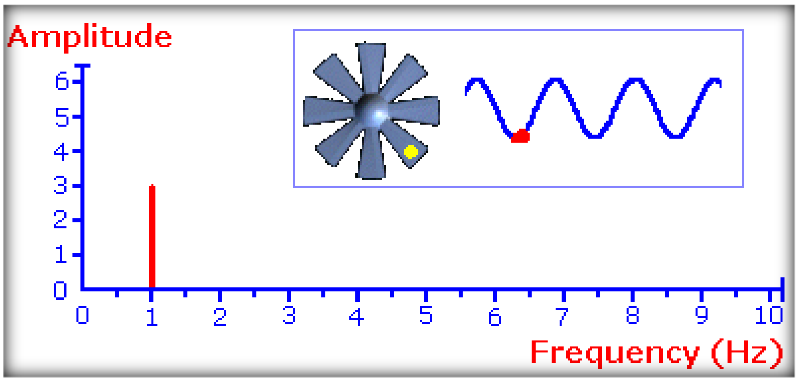


ونبدأ مع هذا الرسم البيانى. لقد رسمنا رسم بيانى الذى يبدأ من (٠) هرتز (أى أن الماكينة متوقفة) إلى (١٠) هرتز. تذكر أن (١٠) هرتز تعنى (١٠) دورة فى الثانية، أو (٦٠٠) سيكل فى الدقيقة. والمحور الصادى مرقم من (٠) (لا يوجد إهتزازات) إلى (٦) (لاتقلق من الوحدات حاليا).

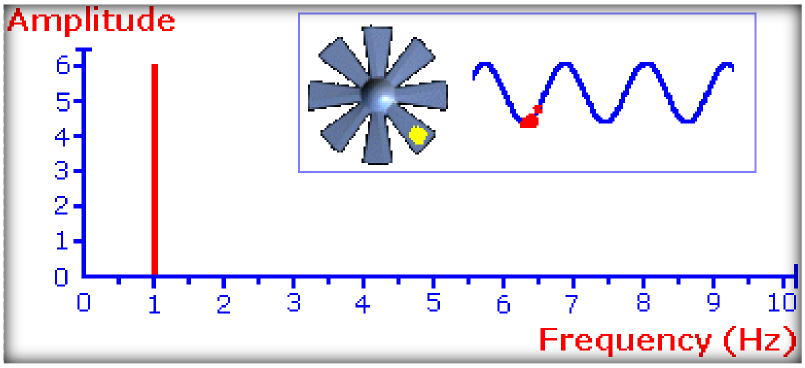


٢-٤- تمثيل عدم الإتزان فى بصمة الإهتزازات

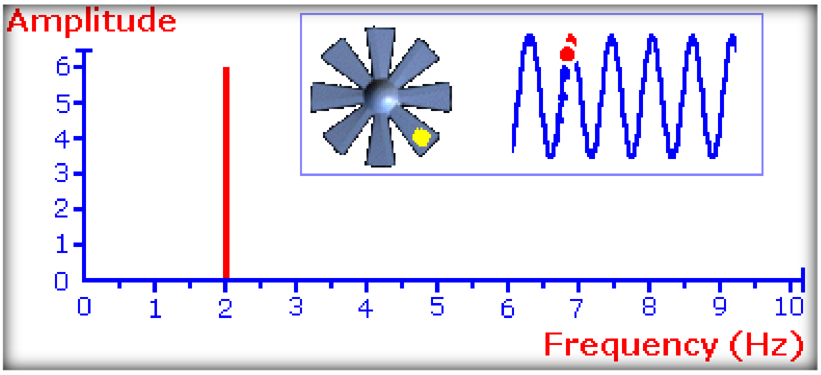
الآن نرسم خط للمروحة نتيجة إضافة ثقل عدم الإتزان (عدم الإتزان)، وسرعة المروحة عند (١) دورة فى الثانية (60 CPM). ونفترض أن السعة كانت (٣).



والآن ماذا لو وضعنا عملة أكبر "bigger coin" على ريشة المروحة بحيث يكون مستوى الإهتزازات الضعف. ونلاحظ أن الخط فى الرسم البيانى الذى لدينا هو الضعف (السعة تساوى ٦) ولكن التردد لم يتغير.



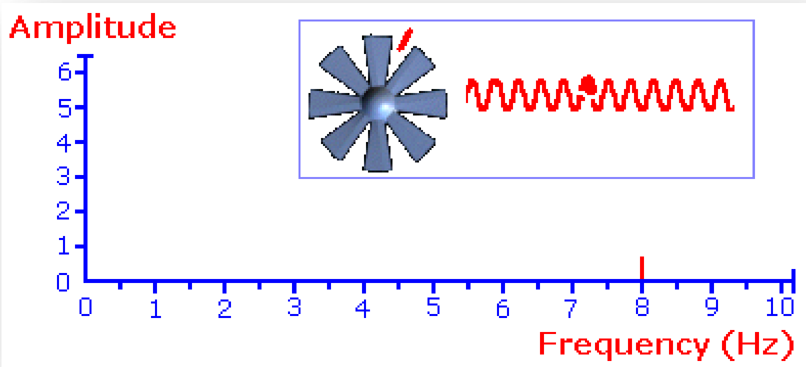
ماذا لو ضاعفنا سرعة المروحة وننسى أن مستوى الإهتزازات سوف تزداد مع إضافة قوة الطرد المركزى "centrifugal forces" إرتفاع الخط لم يتغير ولكنه تحرك (٢ هرتز).



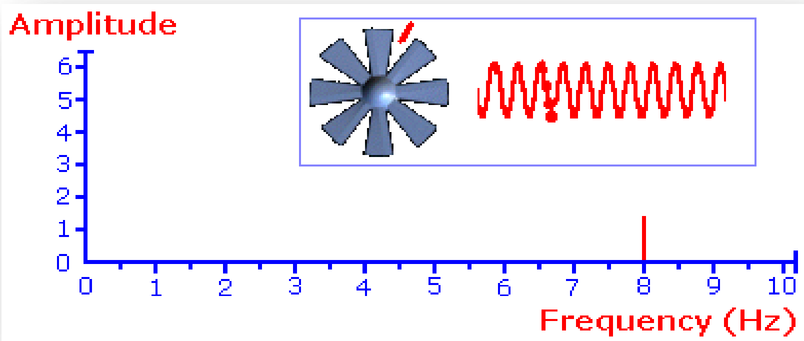
٢-٥- تمثيل إحتكاك الريش فى بصمة الإهتزازات

سنعمل الآن على خلع كتلة عدم الإتزان "coin"، ونعيد السرعة إلى (١هرتز)، ونقوم بعمل إحتكاك بوضع كارت بحيث يكون ملامس لرأس ريش المروحة كما بالرسم (أى عملنا إحتكاك بين الكارت وريش المروحة ويمكننا سماع الإحتكاك الآن).

وكل ما يمكن أن تسمعه هو الإهتزازات عند ثمانية (٨) أضعاف سرعة المروحة. ولكن مستوى الإهتزازات هو فقط ثلث ما كان عليه عندما كانت العملة ملصوقة على الريش. وبالتالى التردد هو (٨ هرتز) والسعة هى فقط (١).

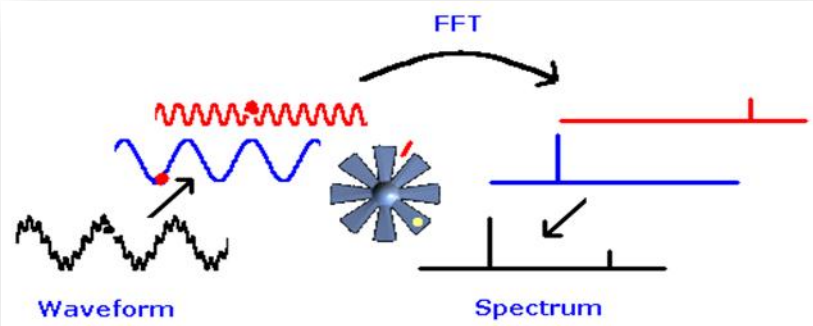


وإذا كان لنا أن نجبر الكارت الذى يحتك بريش المروحة على مزيد من الإحتكاك (بدون إبطاء المروحة)، ومن ثم إرتفاع خط (٨ هرتز) سيزداد.



الخلاصة:-

هل ترى ما الذي حدث؟ كلما غيرنا مصدر الإهتزازات، الرسم البيانى الذى لدينا يتغيرتبعاً لذلك. إما التغير فى السعة "amplitude" (إرتفاع الخط) ، أو التغير فى التردد "frequency" (الوضع الإفقى للخط)، أو كلاهما. هذه هى البصمة "spectrum ".

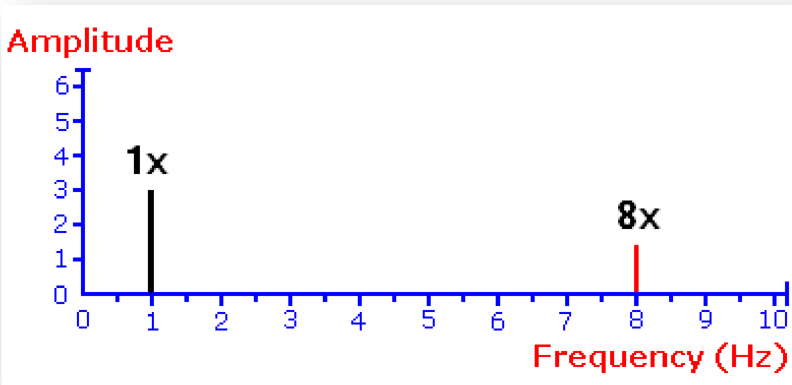


هذا التوضيح يبين لنا عملية إنشاء بصمة الإهتزازات وذلك بفصل أو تقطيع الشكل الموجى " time waveform" إلى عناصره أو مكوناته الأساسية، وتحديد التردد والسعة لتلك الأجزاء لبناء البصمة "spectrum".

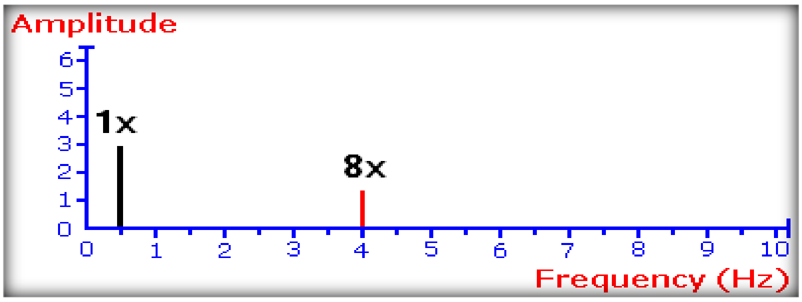
٢-٦- وحدة جديدة من التردد: مضاعفات السرعة "orders"

هل لاحظت أنه عادة ما يشار إلى التردد بأنه مقدار منسوب إلى سرعة الدوران بدلاً من المصطلحات الثابتة، على سبيل المثال (CPM) أو (Hz). معرفة التردد بالهرتز أو السيكل فى الدقيقة مفيد، والأكثر إفادة هو معرفة التردد النسبى.

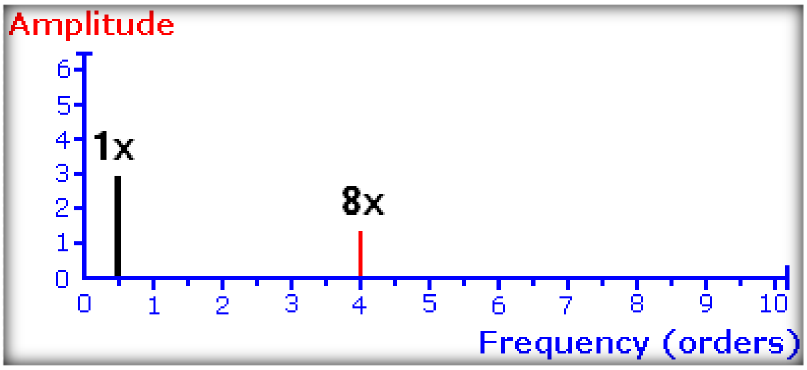
إذا ذكرت أن ذروة "peak" (1X) كانت عالية، فإن معظم المحللين يعلموا أنك تتحدث عن الذروة عند سرعة الدوران (لأن هذا التردد هو "١" مضروب فى سرعة الدوران الماكينة). وفى مثالنا، يجب أن نشير إلى ذروة "peak" (8X) (تردد ريش المروحة) وهى الذروة "peak" عند (٨) أضعاف تردد سرعة الدوران.



هذا مثال سهل جداً- لأن الماكينة تعمل عند (١) هرتز. ولكن حتى لو أن المروحة تدور عند (٠.٥) هرتز أو (٢٠) هرتز، التردد الناتج من إحتكاك الكارت مع ريش المروحة يكون مساوياً دائماً (٨) مرات من سرعة الدوران.



لذلك، بدلاً من عرض الرسم البيانى للبصمة بوحدات الهرتز (HZ) أوالسيكل فى الدقيقة (CPM) على المحور الإفقى السينى (x-axis)، سنغيره إلى (Orders). حيث أن (1X peak) تكون (one order)، و (8X peak) تكون (8 orders) من سرعة الدوران. وببساطة عبارة عن التردد الفعلى مقسوم على سرعة التشغيل.



وبالنسبة للماكينات الأكثر تعقيداً "complex machines"، مع عدد كبير من الأجزاء الدوارة، الشكل الموجى "time waveform " وبصمة المعدة "spectrum" تصبح أكثر تعقيداً.

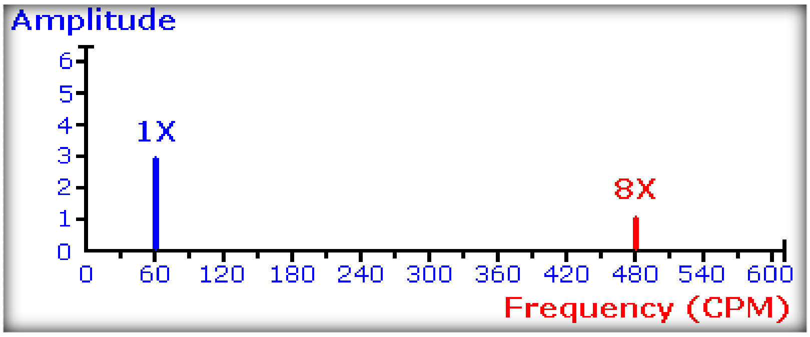
٢-٧- مراجعة البصمة

سوف نراجع بعض النقاط الهامة. الأول هو كل جزء دوار مسئول عن توليد إشارة واحدة أو أكثر بتردد، سعة، وزاوية طور "phase".

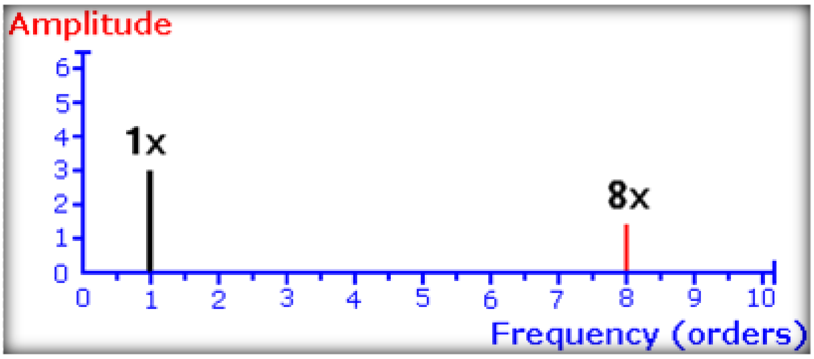
المزيج من جميع الإشارات المقاسة (من على نقط القياس للماكينة) تتجمع كلها لتشكل الشكل الموجى "time waveform". الشكل الموجى يمكن أن يشمل فى الواقع ضوضاء، وإهتزازات منقولة من ماكينات أخرى، والإشارات التى من الممكن أن تتولد هى ببساطة بسبب طريقة مزج هذه الإشارات معاً.

يمكن فصل أو تقطيع أى شكل موجى "time waveform" إلى "infinite" عدد غير محدود من الإشارات النقية، كل واحدة بتردد، سعة وزاوية طور. ويمكننا تمثيل تلك الإشارات الفردية بإعتبارها بصمة المعدة "spectrum". وكل خط فى بصمة الإهتزازات تمثل إشارة فردية. إرتفاع الخط (المحور الصادى) يمثل السعة "amplitude"، والخط الإفقى (المحور السينى) يمثل التردد.

التردد يمكن تمثيلة بواسطة قيمة مطلقة، وعادةً Hz (هرتز أو سيكل فى الثانية)، أو CPM (سيكل فى الدقيقة) – والسيكل فى الدقيقة أكثر شيوعاً فى تطبيقاتنا.

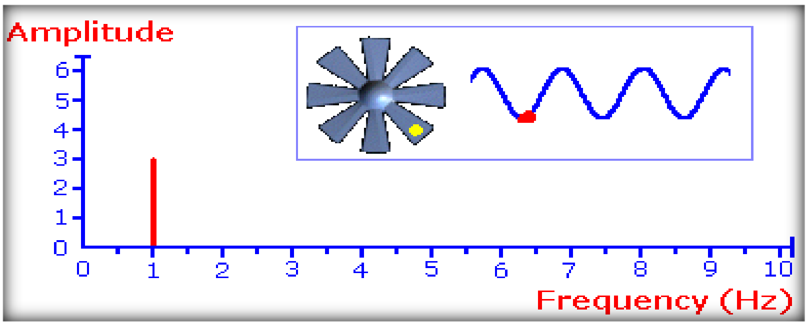


وبدلاً من تمثيل التردد بالسيكل فى الدقيقة (CPM) فى بصمة الإهتزازات، يمكننا أيضاً قسمة كل من الترددات على سرعة تشغيل الماكينة. والوحدة هى "orders". وبالتالى الخط فى البصمة عند سرعة دوران الماكينة هو (١) order.



ونفعل ذلك لأن معظم الترددات التى نهتم بها ترتبط بطريقة أو بأخرى بسرعة الماكينة. فإذا كانت سرعة الماكينة بطيئة نوعاً ما، والقمة "peaks" فى البصمة ستتحرك إلى اليسار. وإذا كانت السرعة عالية نوعاً ما، القمة ستتحرك فى البصمة إلى اليمين. ولكن بإستخدام (order) القمة تبقى فى نفس المكان فى البصمة، بغض النظر عن سرعة الماكينة.

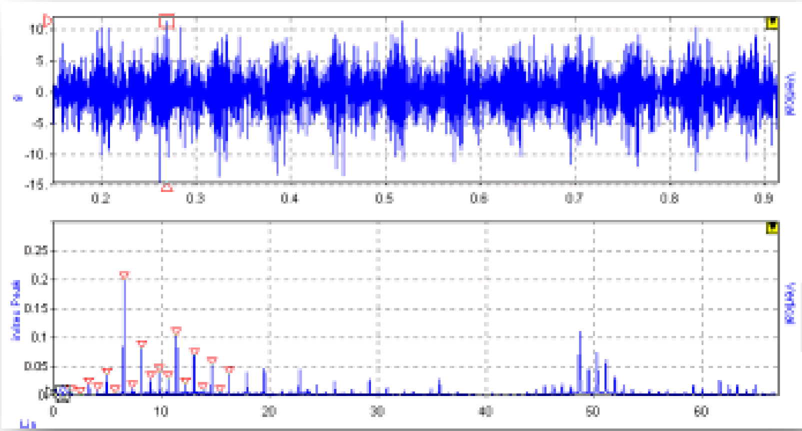
عندما نحدد التردد المتوقع لكل زروة "peaks" فى البصمة، فى العاده هو نسبة من سرعة الدوران. وفى مثالنا، لدينا مروحة تولد قمة "peaks" عند سرعة الدوران. ونسمى هذا (1X) مرة واحدة عند سرعة الدوران.



ونجد أيضاً عندما نضع الكارت على ريش المروحة فإننا نسمع ترددات عالية عند (٨) مرات سرعة الدوران. والبصمة تحتوى على قمة "peaks" عند (8X).

٣- قراءات المستوى العام للإهتزازات "Overall level readings"

حتى الآن ركزنا فى الغالب على الشكل الموجى "time waveform" والبصمة "spectrum". ورأينا أن هذان الشكلين من بيانات الإهتزازات "vibration data" غنيان بالتفاصيل والمعلومات. وبالنسبة لبعض الناس ولبعض التطبيقات فهي غنية جداً.



وهناك محاولات عديدة لإستخلاص رقم واحد يمكن مقارنتة مع مستويات مرجعية " reference levels" من أجل تحديد ما إذا كانت الماكينة بحالة جيدة "OK" أم لا.

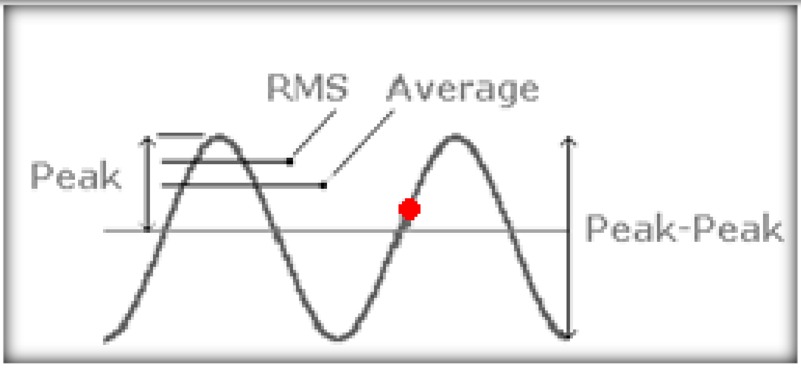
فى الواقع، ولسنوات عديدة (وأعتقد حتى اليوم)، الباحثين حول العالم حاولوا إستنتاج رقم سحرى واحد "magic" الذى من الممكن أن يستخدم للماكينات الدوارة لتحديد حالتها وأخذ القرار بأن تعمل أم لا "go - no go". وهناك محاولات عديدة، تعتمد أساساً على القياس المباشر والحسابات بإستخدام الأشكال الموجية "waveforms" والبصمات "spectra" ولكن حتى الآن لم يكتمل لها النجاح.

وهذا لا يعنى أن ليس هناك بعض القياسات الممتازة التى يمكن إستخدامها فى عمل منحنى الإطراد (trending) والمقارنة بمستويات الإنذار، ولكن الحل السحرى "silver bullet" ليس موجوداً.

اليوم معظم الموردين تقدم لك مجموعة متنوعة من البارامترات التى يمكن أن تتابع بواسطة منحنى الإطراد "trending". بعضها هى براءة إختراع بعض التكنولوجيات "patented technologies".

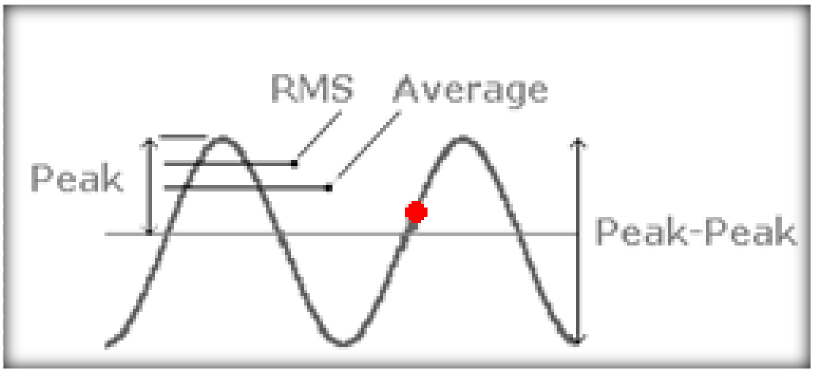
دعونا نبدأ من البداية. المستوى العام "overall level" هو مستوى "rms" للإشارة. وعندما درسنا أساسيات الإهتزازات تعرضنا إلى المستويات الآتية "rms"، "peak"، "peak-peak" و"average".

ويستخدم مستوى (rms) كمقياس للإهتزازات منذ فترات طويلة.



قبل الأجهزة المحمولة الحديثة ومنها اليوم جهاز جامع بيانات الإهتزازات "data collectors"، كان القياس الشامل للإهتزازات الأكثر شيوعاً لقياس الإهتزازات. ولا يزال كثير من الناس حتى اليوم تشترى عدادات قياس بسيطه "meters" لقياس المستوى الشامل للإهتزازات والغرض منه القياس "measure" والعرض "display" والتخزين "store". وهو مفيد لمعرفة المستوى الشامل للإهتزازات. وعموماً، كلما كانت حالة الماكينة أسوأ كلما زاد المستوى الشامل للإهتزازات (rms). يتم حساب المقياس الشامل "overall level" بإعتبار الإهتزازات فى مدى تردد " frequency range" من (10) إلى (1000) هرتز فقط. وبهذه الطريقة من الممكن للأشخاص إستخدام المقياس الشامل كأساس أو مرجع للمقارنة.

فى بعض التطبيقات مستوى (rms) لا يتم إستخدامه ويستخدم بدلاً من ذلك مستوى القمة "peak" أو مستوى "peak-peak" ويستخدم كعدد فردى لوصف حالة الماكينة. ويتم ذلك بصفة خاصة للماكينات التى تستخدم سبائك كراسى التحميل "journal bearing" وفيه يتم إستخدام الإزاحة "displacement" فى القياس.



وللأسف فإن المستوى العام للإهتزازات (rms) لايخبرك عن حالة الماكينة أوما هو الخطأ بها وهو أكثر حساسية للإشارة المسيطرة وهى (1X) "dominant signals".

ومن المستحيل عملياً أن يخبرنا عن نوع المشاكل فى الماكينة، بالإضافة إلى عدم حساسيتها للإشارات ذات السعات المنخفضة "low amplitude". ومن المعروف أن هذا القياس ليس إلا أداة للكشف "detection" وليس أداة تحليل "analysis".

لسنوات عديدة كانت هناك أيضاً بارامیترات "parameters" عددية (رقم فردى) والتى تم إبتكارها وتركز على بيانات الترددات العالية "higher frequency data" وصممت خصيصاً لتعطى مؤشراً عن حالة رولمان البللى.

وهذه البارامیترات "parameters" تشمل كل من "Spike Energy"، "SEE"، "HFD" و" Shock Pulse".

في هذه الأيام يمكننا أن نشتق بعض البارامیترات التى تختص بمنحنى الطور "trend" بعدة طرق ويمكننا قياس المستوى العام للإهتزازات والترددات العالية (قياسات رولمان البللى) بجهاز جامع البيانات "data collector". ويمكننا إستخراج البارامترات من البصمة "spectrum" (بإستخدام بعض البرامج) لعمل "trending" وعمل تحذير "alarming".

هذه البارامیتر تشتمل على الكريست فاكتور "crest factor" (الناتج من قسمة القمة "peak" على "rms" مربع الجذر التربيعى)، وغيرها من البامیترات التى تحسب شدة المشكلة " problem severity" بواسطة نظام الخبير "expert system". والهدف من هذه البارامیترات لفت إنتباه محلل الإهتزازات للماكينة التى من الممكن أن تكون بها مشكلة.

ومن خلال بصمة المعدة والشكل الموجى وغيرها من البيانات المتاحة يمكننا تحديد حالة الماكينة وجسامة المشكلة إن وجدت.

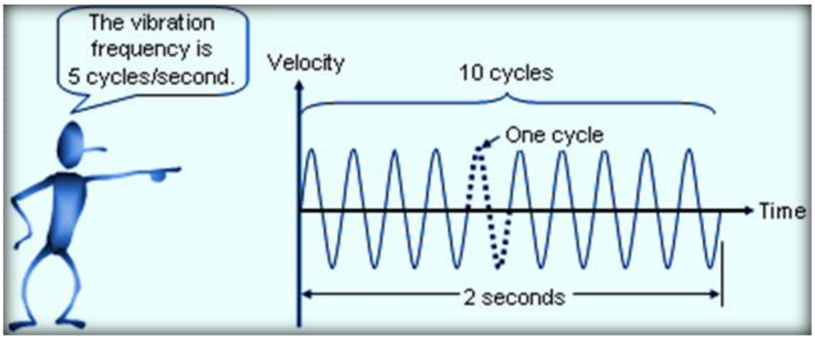
القسم الثالث:- قياس التردد "measurements frequency"

١- التردد "frequency"

قياس معدل نبض "pulse rate" المريض يشير إلي الحالة الصحية وبالمثل فإن معدل الإهتزازات أو التردد "frequency" للماكينة غالباً ما يكون مؤشراً مفيداً لمعرفة حالة الماكينة وكلما زاد معدل التردد كان تذبذب الماكينة سريعاً.

والتردد يشير إلي عدد مرات حدوث شيء ما مثلاً عدد المرات التي يتحرك فيها بيت البللى "bearing housing" صعوداً وهبوطاً.

ويمكننا تحديد التردد لأى جسم بحساب عدد الدورات الكاملة التى أنجزها فى الثانية الواحدة. على سبيل المثال جسم يمر بخمس دورات إهتزاز كاملة كل ثانية يقال أنه يهتز عند تردد ٥ سيكل/ثانية كما هو موضح أدناه.



والموجة فى الشكل السابق توضح دورة واحدة (cycle) ويمكن حساب التردد (f) من الزمن المطلوب لدورة واحدة فى الموجة الجيبية. والتردد (f) هو معكوس "inverse" الفترة الزمنية (T).

مثال:- إذا كانت دورة واحد (سيكل) تأخذ ٢٢.٤٦ مللى ثانية (ms) فإن T تساوى ٢٢.٤٦ مللى ثانية وتساوى ٠.٠٢٢٤٦ ثانية

ويحسب التردد F كالآتى:-

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.02246}$$

$$= 44.5 \text{ Hz} = 2670 \text{ CPM}$$

١-١- طرق التعبير عن التردد

كما هو الحال مع السعة لدينا ثلاثة طرق للتعبير عن التردد.

١- ويتم التعبير عن وحدات التردد بالهرتز ويرمز له بالرمز هرتز "Hz" فى النظامين المترى والإنجليزى. يحسب التردد بعدد الدورات فى الثانية الواحدة (CPS) والذى يعرف عادةً بإسم الهيرتز (Hz).

٢- يحسب التردد بضرب الهيرتز أو عدد الدورات فى الثانية الواحدة (CPS) فى ٦٠ نحصل على الدورات فى الدقيقة الواحدة (CPM).

مع العلم بأن (CPM) مألوفة لنا لأنه فى معظم الحالات هى نفسها عدد اللفات لكل دقيقة (RPM).

٣- يمكنك حساب التردد أوردر (orders) وهو يرتبط مباشرة بسرعة دوران الماكينة.

مثال١:- إذا كان سرعة الدوران للماكينة (Turning Speed "TS") = ١٨٠٠ سيكل/دقيقة كان ترددها يساوى ٣٠ هيرتز (١٨٠٠/٦٠).

مثال٢:- إذا كان واحد أوردر "Order" يساوى ١٨٠٠ سيكل/دقيقة فإن قيمة ٢ "Order" يساوى ٣٦٠٠ سيكل/دقيقة وقيمة ٣ "Order" يساوى ٥٤٠٠ سيكل/دقيقة وهكذا.

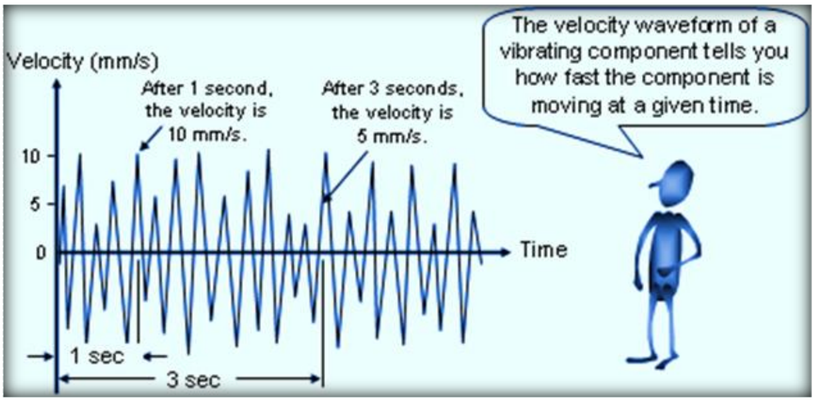
مثال٣:- إذا كان سرعة الدوران للماكينة "TS" = ٥٠٠٠ سيكل/دقيقة كان التردد يساوى ٨٣.٣ هيرتز وكان واحد أوردر "Order" يساوى ٥٠٠٠ سيكل/دقيقة و ٢ "Order" يساوى ١٠,٠٠٠ سيكل/دقيقة و٣ "Order" يساوى ١٥,٠٠٠ سيكل/دقيقة وهكذا.

٢- الموجة الجيبية "Waveform"

عرض الصورة البيانية الكهربائية للقلب مفيدة لتحليل الحالة الصحية للشخص وعلى نحو مماثل عرض صورة الحركة الإهتزازية أداة مفيدة "useful tools" لتحليل طبيعة الإهتزازات " nature of vibration".

فى الموجة الجيبية نجد فى كثيراً من الأحيان دلائل على أسباب وحدية المشاكل "severity". و الموجة الجيبية "Waveform" كثيراً ما تستخدم بواسطة محللى الإهتزازات وهى مجرد مخطط يدل على كيفية تغير مستوى الإهتزازات "vibration level" مع الزمن.

كما هو موضح بالشكل الآتى:-



كمية المعلومات فى الموجة الجيبية "waveform" تعتمد على المدة "duration" و"resolution".

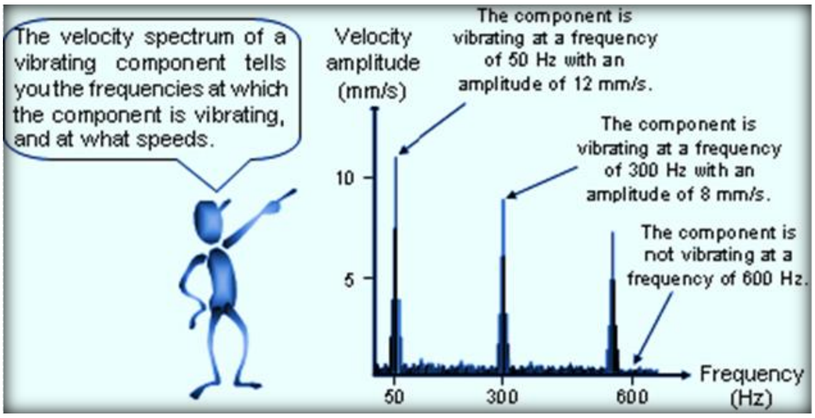
المدة "duration" للموجة الجيبية هي الفترة الزمنية الكاملة التي تمكنا من الحصول علي المعلومات منها. وبضع ثوان "few seconds" كافية لذلك في معظم الحالات. و"resolution" للموجة الجيبية

هو مقياس لمستوى التفاصيل ويتم إظهار تلك التفاصيل تبعاً لنقط البيانات أو لعدد العينات "samples" وكلما كثرة العينات كثرت التفاصيل فى الموجة الجيبية.

٣- بصمة الاهتزاز "spectrum"

نوع آخر من الشائع إستخدامه فى تحليل الإهتزازات هو بصمة إهتزاز المعدة "spectrum" وهى أداة مفيدة فى عرض الصورة البيانية لترددات أجزاء الماكينة مع قيمة السعة "amplitudes" لكل تردد. ويتم تحليل بصمة الاهتزاز عن طريق تجزئ إشارة الإهتزاز إلى ترددات وقياس مستوى الاهتزاز عند كل تردد وبالتالي يمكن التعرف على أسباب الأعطال والخلل في الماكينات المختلفة اعتماداً على الخبرة التي تراكمت حتى الآن لتحليل وفهم مضمون إشارات الاهتزاز الصادرة من الماكينات الدائرة.

ملحوظة:- يعتبر مستوى قياس الاهتزاز "overall value" بياناً لعنف الاهتزاز "severity" الحادث على سطح الماكينة ولكن هذا لا يساعد في التعرف على أسباب الاهتزاز ومواضع الخلل ولا يتم إلا بمعرفة التردد الذي يحدث عنده أعلى مستوى للإهتزاز.



ولكن كيف لجزء مفرد "single" من الماكينة يتذبذب بشكل متكرر بأكثر من تردد واحد؟

تكمن الإجابة فى الحقيقة بأن إهتزاز الماكينة ليس نتيجة حركة تذبذبية بسيطة واحدة للبندول ولكنها تتكون من العديد من الحركات الإهتزازية تأخذ مكانها بشكل متكرر.

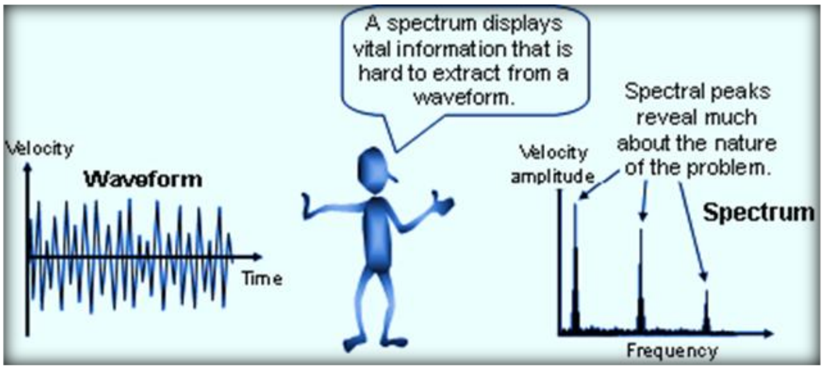
على سبيل المثال بصمة الاهتزاز "velocity spectrum" لرولمان بللى تظهرأنه يهتز ليس عند تردد واحد ولكن عند ترددات مختلفة. الإهتزازات عند بعض الترددات عادةً ما تكون بسبب حركة أجزاء رولمان البللى، عند ترددات أخرى مختلفة بسبب تأثير تعشيق التروس وإختلاف أسنانها و كذلك دوران الموتور.

ولأن بصمة الاهتزاز "spectrum" تبين الترددات التى عندها تحدث الإهتزازات وبالتالى تصبح أداة مفيدة جداً فى تحليل الإهتزازات من خلال دراسة كل تردد لكل جزء من أجزاء الماكينة التى تهتز وكذلك قيمة السعة عند كل تردد من هذه الترددات، وبالتالى يمكننا إستنتاج الكثير عن أسباب

الإهتزازات وحالة المعدة وبذلك تصبح بصمة الاهتزاز هى الأداة الرئيسية لتشخيص وتحليل الإهتزازات.

فى المقابل "waveform" لا تعرض بوضوح الترددات الفردية التى تحدث عندها الإهتزازات ولكنها بدلاً من ذلك تعرض فقط تأثير المستوى العام لقيمة الإهتزازات "overall" ومن ثم ليس من السهل تشخيص وتحليل مشاكل الماكينات بإستخدام "waveform" بإستثناء حالات خاصة قليلة.

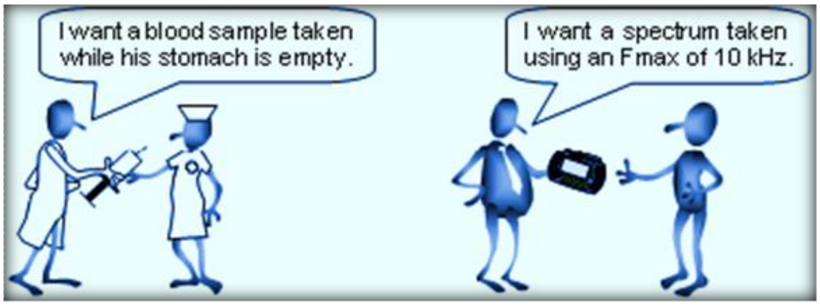
ملحوظة:- "Spectra" هى صيغة الجمع "Spectrum"



٤- بارامترات قياس الإهتزازات "measurement parameters"

بارامترات القياس هى التفاصيل "details" الواجب إتخاذها لتحديد كيفية القياس. وعن طريق تحديد بارامترات القياس يمكننا تحديد شكل البيانات التى يتعين جمعها وطريقة معالجتها "processed" قبل تقديمها إلينا.

ويمكن تشبيه بارامترات قياس الإهتزازات بالتفاصيل التى يحتاجها الطبيب قبل الفحص الطبى (مطلوب عينة دم عندما تكون المعدة خاوية).



٤-١- بارامترات قياس بصمة المعدات (Spectral lines – Fmax)

المعلومات التى تحتويها بصمة الإهتزازات "spectrum" تعتمد على إختيار القيمة القصوى للتردد "Fmax" وعلى "resolution" للبصمة حيث أن "Fmax" لبصمة الإهتزازات هو مدى التردد "range" الذى من خلاله يمكننا الحصول على معلومات من البصمة.

ومقدار "Fmax" تعتمد على سرعة التشغيل للماكينة وكلما إرتفعت سرعة تشغيل الماكينة يجب أن ترتفع قيمة التردد إلى الحد الأقصى "Fmax". ودرجة التركيز (الدقة – الوضوح) "resolution" هو مقياس لمستوى التفاصيل "detail" فى البصمة ويحدد بعدد الخطوط بالبصمة التى تميز شكل البصمة وكلما زادت عدد الخطوط تكون البصمة أكثر تفصيلاً " more detailed".

قبل أخذ قياسات الإهتزازات (قياس بصمة المعدة "spectrum") نحن بحاجة لمعرفة كيفية وضع بارامترات القياس التى سوف نستخدمها وتأثيرها على سرعة جمع القياسات "data collected" ومدى التردد المراد قياسة "frequency range" ووضوح البيانات.

٤-١-١- تأثير البارامیتر "Fmax" والخاص بنطاق التردد وسرعة البيانات

إختيار القيمة القصوى للتردد "Fmax" تحدد نطاق "range" التردد المطلوب وكذلك سرعة جمع البيانات هى "Fmax" وكلما إرتفعت قيمتها كبر نطاق التردد "frequency range" وزادت المعلومات المعروضة والتى يمكن الحصول عليها فى بصمة المعدة "spectrum" وزادت أيضاً سرعة القياس.

إرتفاع سرعة التشغيل للماكينة يزيد من إرتفاع تردداتها وبذلك سوف نحتاج إلى رفع قيمة "Fmax" بمقدار يكفي عادةً لالتقاط كافة المعلومات الهامة لسلوك الإهتزازات عند تلك الترددات العالية.



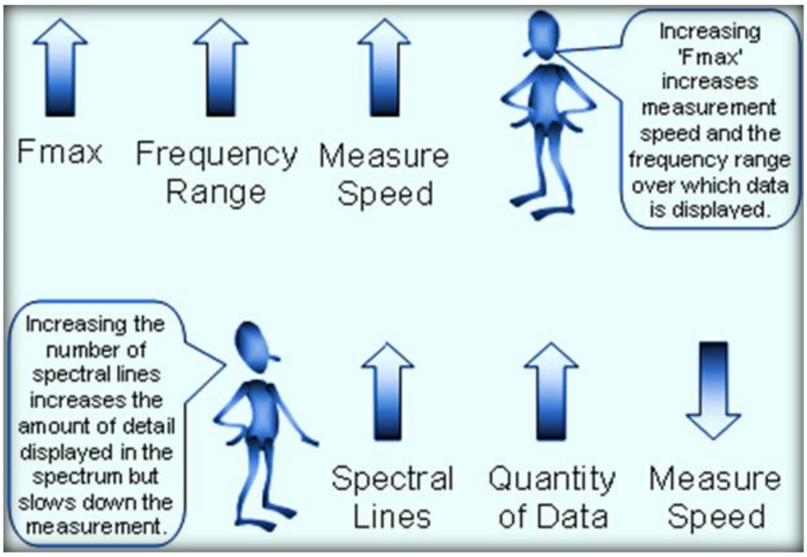
وقيمة "Fmax" الموصى باستخدامها هى (عشر) أضعاف سرعة التشغيل للمعدات التى لا تتضمن الأصابع الدوارة "rotary fingers".

على سبيل المثال إذا كانت سرعة التشغيل "rpm" هى 10 000 دورة/الدقيقة تكون قيمة "Fmax" هى 100 000 لفة/الدقيقة (١٠٠ kcpm) تكون كافية جداً لإلتقاط كافة المعلومات.

وتوضع "Fmax" (ثلاثة) أضعاف عدد الأصابع "number of fingers" مضروبة فى سرعة التشغيل للمعدات التى تتضمن الأصابع الدوارة "rotary fingers" مثل كل من أسنان التروس "gear teeth" وريش المراوح "fan blades" وريش الطلمبات "vanes pump" وأجزاء رولمان البللى"bearing elements".

على سبيل المثال ترس "gear" مسنن ١٢ سن يدور عند سرعة ١٠٠٠٠rpm فتكون قيمة "Fmax" 000 360 cpm (360 kcpm) تكون كافية جداً لإلتقاط كافة المعلومات.

وإذا كانت قيمة "Fmax" كبيرة جداً سيكون "resolutio" للبصمة منخفضة ويمكن أن تضيع المعلومات الخاصة بالترددات المنخفضة. وبالتالى يكون من الضرورى فى بعض الأحيان أن تكون "Fmax" منخفضة وفى البعض الآخر عالية.



٤-١-٢- تأثير البارامتر "Spectral lines" والخاص بدرجة تركيز ودقة بيانات البصمة

كلما زادت خطوط البصمة "Spectral lines" كلما حصلنا على مزيد من المعلومات. وهذا يعنى كلما أردنا جمع مزيد من البيانات للحصول على معلومات إضافية يتعين علينا زيادة عدد الخطوط "lines" وبالتالى يأخذ القياس مدة أطول أى تقل سرعة القياسات.

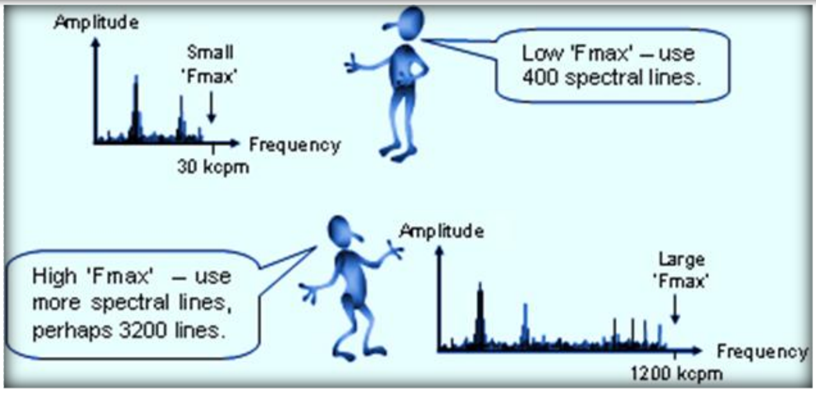
والرسم البيانى الآتى يوضح ذلك:-

وعدد الخطوط الموصى بإستخدامها فى القياسات العادية ٤٠٠ خط من خطوط ودرجة التركيز (الدقة – الوضوح) "resolution". وإذا كانت قيمة "Fmax" المستخدمة كبيرة فإن الخطوط ستنتشر على مدى تردد كبير وسوف تترك فجوات واسعة "wide gaps" بين الخطوط.

وبالتالى مع كبر قيمة "Fmax" نحتاج إلى خطوط كثيرة فى بصمة الإهتزازات للتغلب على فقد المعلومات وخسارة التفاصيل.

وعلى كل حال يجب أن نلاحظ أنه كلما إستخدمنا خطوط كثيرة كلما زاد زمن القياس وكلما إستخدم جزء كبير من ذاكرة الجهاز.

وبذلك يمكننا أن نستخدم قيمة عالية "Fmax" أوعدد كبير من الخطوط " high number of spectral" عند الضرورة فقط.

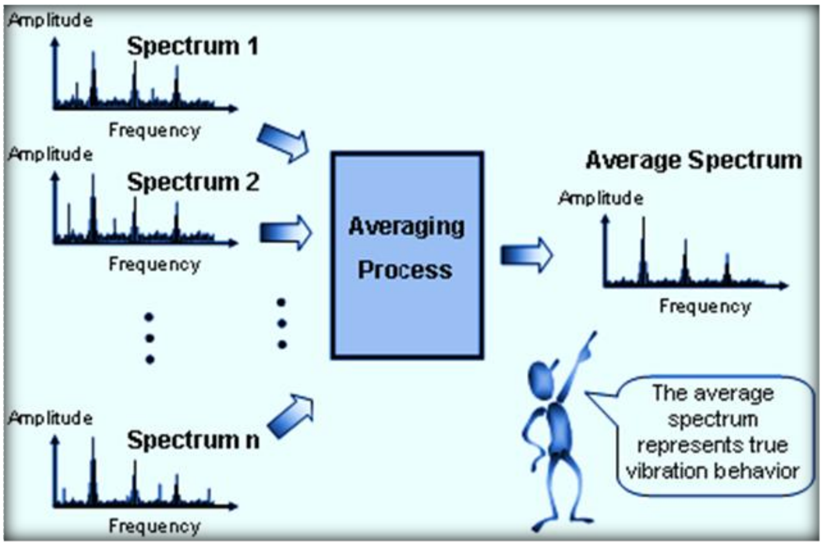


٥- بارامترات معالجة البيانات "data processed"

نتخيل أننا أردنا معرفة عرض الصفحات فى هذا الكتاب بدقة لأن العرض يمكن أن يتفاوت بعض الشئ من صفحة إلى أخرى وبالتالى لانقيس عرض صفحة واحدة ولكن بدلاً من ذلك نقيس بضع صفحات وبعد ذلك نأخذ المتوسط "average".

بنفس الطريقة عند قياس الإهتزازات نقيس عادةً عدد من البصمات "spectra" ثم يتم حساب المتوسط لإنتاج بصمة متوسطة "average spectrum" وهى أفضل تمثيل لسلوك الإهتزازات "vibration behavior" حيث أن معالجة البيانات بهذه الطريقة تقلل تأثير " minimizes the effect" الإهتزازات العشوائية "random variations" أوالضوضاء "noise" المصاحبة لإهتزاز الماكينات.

والبارامترات التى تحدد كيفية معالجة البيانات هى:-



٥-١- نوع المتوسط المستخدم "Average type" (متوسط خطى أو متوسط أسى)

البارامتر "Average type" يحدد كيفية أخذ المتوسط للبصمة وهو إما متوسط خطى "Linear" وهو موصى به "recommended" فى أغلب الحالات "most cases". أوالمتوسط الأسى

"Exponential" عادةً ما يستخدم فقط عندما يتفاوت سلوك الإهتزازات "vibration behavior" بشكل ملحوظ "significantly" بمرور الوقت.

وأخيراً "Peak hold" وهو حقيقة لا يتضمن المتوسط ولكن يستخدم فى أسوأ الحالات "-worst case" لعرض أكبر سعة "largest" لكل خط فى بصمة المعدة "spectral line".

٥-٢- عدد المتوسطات "Number of averages"

باراميتر عدد المتوسطات "Number of averages" يحدد عدد البصمات المتتالية المستخدمة لحساب المتوسط.

كبر عدد البصمات "spectra" المستخدمة لحساب المتوسط تسهل من تقليل تأثير التغيرات العشوائية والضوضاء وتزيد من نسبة تمثيل كثير من البصمات الحقيقية الدقيقة. على أية حال كبر عدد المتوسطات يعنى كثرة البيانات المراد جمعها وبالتالى تبطئ من سرعة القياسات ولذلك يتم إختيار عدد المتوسطات "Number of averages" ليكون ٤ متوسطات وهو كافى فى معظم الحالات.

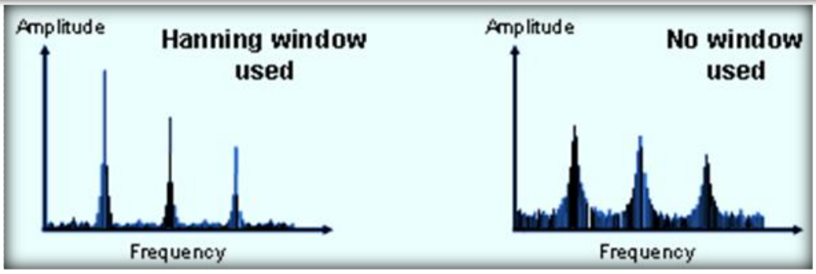


٥-٣- نوع النافذة "Window type" (نافذة هانيننج أو النافذة المستطيلة)

نوع النافذة "Window type" هو البارامتر الذي يحدد نوع النافذة المستخدمة لتعديل البيانات لتلائم بعض التقييدات فى عملية تحويلها إلى بصمة إهتزاز (FFT) ونافذة هانينج "Hanning" عادةً ما تستخدم، أما إذا إستخدمنا النافذة المستطيلة "rectangular" فإن البيانات عملياً ستكون غيرمعدلة.

عادةً البيانات المجمعة "data collected" لاتستخدم مباشرة لتوليد بصمة الإهتزازات "spectrum" ولكن فى أغلب الأحيان تعدل مقدماً لتلائم بعض التقييدات فى عملية تحويلها إلى FFT (العملية التى تحول البيانات إلى بصمة إهتزاز).

والبيانات تعدل عادةً بالضرب "multiplication" مع نافذة التصحيح "correction window" وهذا يمنع خطوط البصمة "spectral lines" من تلطيخها "smearing" أو تسريبها "leaking" إلى أحدهما الآخر.



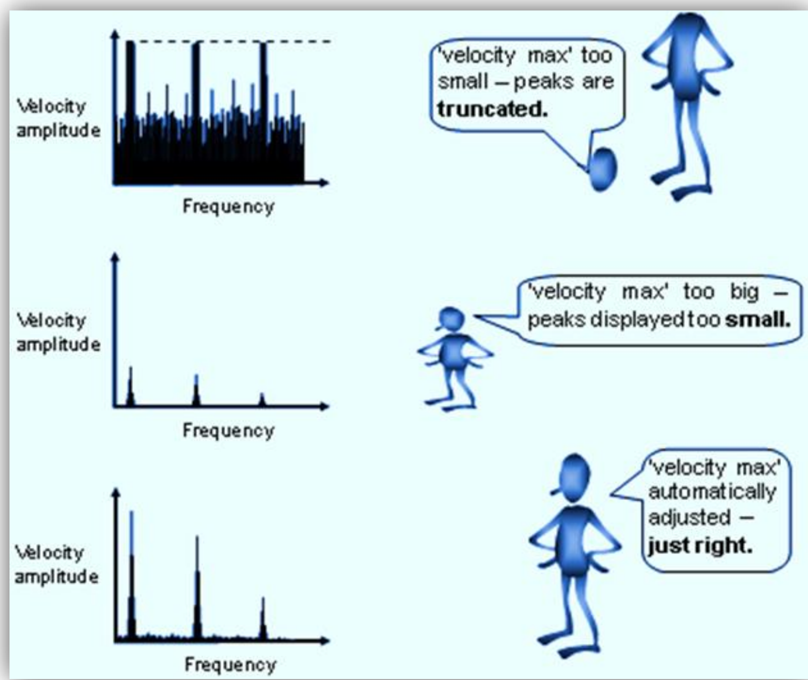
٦- بارامترات تحديد تفاصيل بصمة الإهتزاز "spectrum displayed"

البارامترات الآتية تحدد كيفية عرض بصمة الإهتزاز.

٦-١- مقياس بصمة الإهتزاز "scale of the spectrum"

مقياس "scale" بصمة الإهتزاز يحدد كيفية عرض تفاصيل البصمة بسهولة فإذا وضعت " Velocity max" صغيرةً جداً فإن بيانات البصمة والتى تحتوى على الترددات المختلفة القمم "peaks" تظهر متقطعة "truncated" وإذا كانت "'Velocity max" كبيرةً جداً فإن بيانات البصمة "peaks" تظهر صغيرة.

وعموماً يجب وضع "Velocity max" اوتوماتيك لجعل الجهاز يختار أنسب مقياس للسعة يسمح للقمم "peaks" أن تظهر بشكل واضح كما بالرسم البيانى الآتى:-



٦-٢- نوع السعة "amplitude type"

يوجد نوعين من أنواع السعة الخاصة ببصمة الإهتزاز وهما "peak amplitude spectrum" أو "rms amplitude spectrum" يتم إستخدامهما لتحديد كيفية عرض بصمة الإهتزاز.

وإذا إستخدمنا السعة "peak" فإن بصمة الإهتزاز ستعرض السرعة القصوى "maximum speed" التى أنجزت بواسطة الجسم المهتزعند الترددات المختلفة.

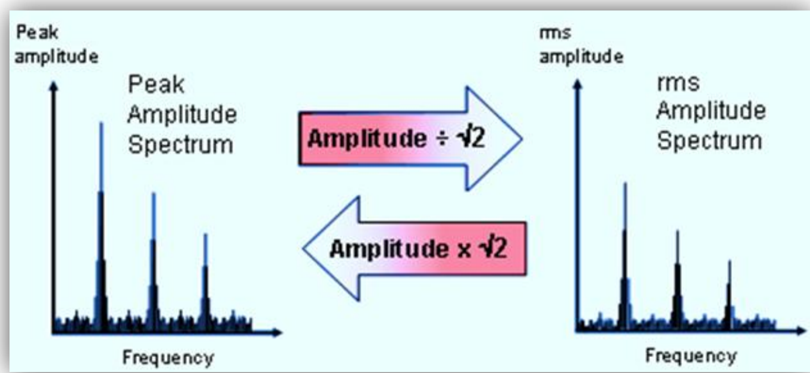
وإذا إستخدمنا السعة "rms" فإن بصمة الإهتزاز ستعرض كمية طاقة الإهتزاز عند الترددات المختلفة. فى بصمة الإهتزاز "peak amplitude" عند تردد معين يساوى √2 (تقريبا ١.٤ مرة) مضروباً فى "rms amplitude" عند نفس التردد وهذه العلاقة ليست صالحة للموجة الجيبية.

rms amplitude ×= 1.14 peak amplitude

peak amplitude×rms amplitude = 0.707

نوصى دائماً بإستخدام نفس نوع السعة "amplitude type" لنفس نقطة القياس لتفادى سوء الفهم حيث أن التحويل من "rms amplitude" إلي "peak amplitude" يسبب إرتفاع ظاهرى فى سعة الإهتزازات التى يمكن ترجمتها بشكل خاطئ كتدهور حالة الماكينة.

ومن الناحية الأخرى هذا التحول من "peak amplitude" إلي "rms amplitude" قد يخفى إرتفاع أصيل فى سعة الإهتزازات.



٦-٣- وحدات السعة "amplitude" والتردد "frequency" لبصمة الإهتزاز

وحدات السعة والتردد المستخدمة فى بصمة الإهتزازات تحتاج أيضاً أن تكون محددة. وأى وحدة ينبغى أن تستخدم هو فعلاً مسألة إختيار شخصى أو فى كثير من الأحيان تبعاً للموقع الجغرافى.

ففى أمريكا الشمالية وحدة السرعة عادةً ما تستخدم بوصة/ثانية (in/s) ووحدة التردد كيلوسيكل/دقيقة "kcpm" (kilocycles per minute)

وفى أجزاء أخرى من العالم وحدة السرعة ووحدة التردد عادةً ماتستخدم ملليمتر/ثانية (mm/s) وهيرتز (Hz) على التوالى.

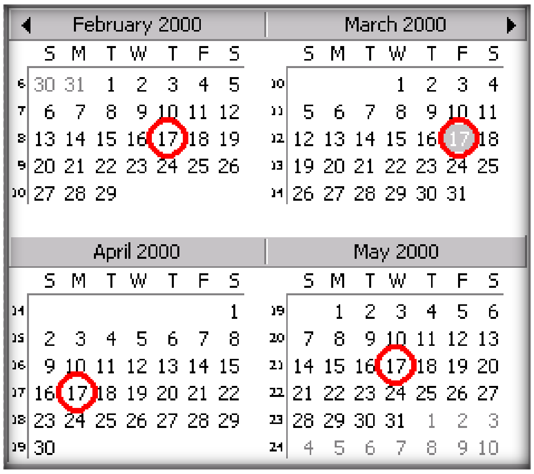
القسم الرابع:– تحليل بيانات الاهتزازات

مقدمه:–

الآن يجب أن يكون لديك فهم جيد جداً لكل من الموجة الجيبية "time waveform" وبصمة المعدة "spectra" والطور "phase" والتوافقات "harmonics" (الصدمات "impacts") وكذلك "sidebands" و"modulation".

الآن سوف نستعرض كيفية تطبيق هذه المعرفة لرصد حالة الماكينات "condition monitoring".
سيكون عملك هو جمع بيانات الإهتزازات على الماكينات بجدول زمنى. وسيتم إختبار الماكينات الأهم "Most important" كل إسبوع والماكينات الأقل أهمية "less important" تقاس كل إسبوعين أو حسب حالة الماكينات.

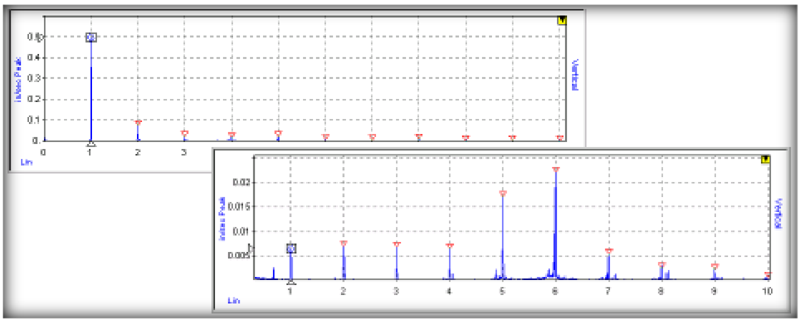
وسوف تراجع البصمات والموجات الجيبية للماكينات لمعرفة ما إذا كانت تشير إلى أى نوع من المشاكل يوجد بالماكينات. والمشاكل تتضمن عدم الإتزان وعدم السنترة وتآكل رولمان البللى وتفكك رولمان البللى والأعطال الكهربية والتفكك الميكانيكى وتآكل ريش الطلمبات وتآكل ريش المراوح وتعشيق التروس ومجموعة أخرى من العيوب.



والخبر السار هو أن هناك أربعة أنواع من مشاكل الماكينات هي أكثر شيوعاً عن الآخرين. وفى بعض الأوساط يشار إليهم بأنهم الأربعة الكبار "big four". وهم عدم الإتزان، عدم السنترة، التفكك ومشاكل رولمان البللى. لذلك وجب التركيز مع هذه الأنواع من المشاكل قبل الخوض فى دراسة المشاكل الباقية.

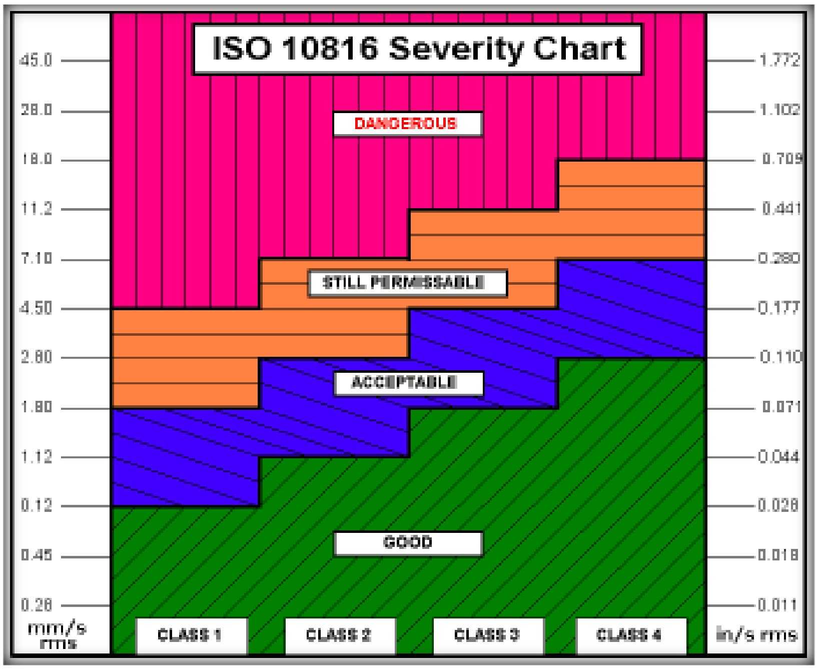
لتشخيص وتحليل مشاكل الماكينات سوف نحتاج لدراسة البصمة والموجة الجيبية بطرق مختلفة. وليس فقط النظر إلى البصمات ومعرفة المؤشرات التى تنبهنا إلى المشاكل والأعطال. والنظر أيضاً إلى مستوى الإهتزازات لمعرفة ما إذا كانت غير طبيعية. ولكن السؤال هو ما هو المستوى الغير الطبيعى "abnormal" للإهتزازات؟.

البصمات "Spectra" تظهر بأشكال وأحجام مختلفة وإذا كان لديك خبرة واسعة مع جميع الماكينات التى يمكنك مراقبتها، فإنك سوف تعتمد على الكشف على تغير مستوى الإهتزاز " changing levels" أكثر من النظر إلى المستويات المطلقة "absolute levels".



ومعايير (الأيزو) المتاحة توفر خطوط إرشادية "guidelines"، ولكن بمجرد تشغيل برنامج المراقبة الخاص بالمعدات سوف تجد نفسك تقارن القياسات الجديدة بالقياسات القديمة، أو بالقياسات التى تم جمعها على ماكينات مماثلة.

وسوف تشاهد التغير فى مستوى الإهتزازات وهذا التغير يشير إلى تفاقم المشكلة، وعادة ما تشاهد التغير على مدى فترة من الزمن. حينئذن سوف تحاول تحديد مصدر الإهتزازات التى تغيرت (فحص الترددات التى حدث بها تغيير) مع العلم بأن بعد أجزاء البصمة لا تتغير على الإطلاق (بعض الترددات).



على سبيل المثال، إذا كانت (1X peak) وهى ذروة "peak" سرعة الدوران زادت على مدى فترة زمنية، فى حين أن بقية البصمة بقيت كما هى لم تتغير، ستكون الماكينة بها على الأرجح عدم

إتزان "out of balance". فى حين أن هناك ذروة تظهر عند (4.9X)، وتوافقاتها "harmonics"، قد نفترض أن الماكينة بها مشكلة رولمان البللى.

ولكن ماذا لو كان هناك ذروة كبيرة عند (4.9X) مع التوافقيات "with harmonics"، ولكن هذا المستوى من الإهتزاز لم يتغير مع مرور الوقت؟ وهذا يبدو من المؤكد وكأنه مشكلة رولمان البللى، ولكن إذا لم يتغير ماذا يجب أن نفعل؟ الإهتزازات ممكن أن تكون منقولة من ماكينة أخرى أو من العملية نفسها "process" أويمكن أن تأتى من أجزاء دوارة أخرى. ولكن إذا لم يتم التغيير، وكنت لا تعتقد أنها تسبب تلف بالماكينة، يمكنك فقط مراقبتها.

وذكر أحد الخبراء فى تحليل الإهتزازات أنه شاهد حالات بها دليل على وجود مشاكل فى رولمان البللى لأكثر من عام ولكن بدون تفاقم الحالة، وليس هناك أى إجراء يتعين إتخاذه فى هذه الحالة. ولكن يتم مراقبة الحالة إلى أن يحدث التغيير - ثم العمل.

١- مقارنة بيانات الإهتزازات

١-١- المقارنة بالبيانات المرجعية

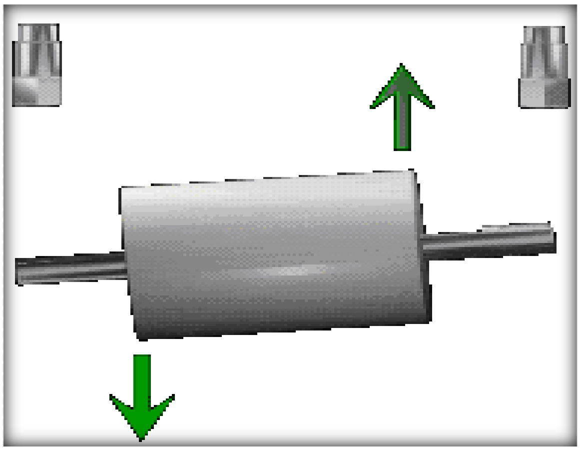
وهناك عدد من المقارنات يمكنك القيام بها. يمكنك مقارنة القياس الحالي مع القياسات السابقة لترى كيف أن المستويات تغيرت مع مرور الوقت.

ويمكنك مقارنة البصمة مع بصمات لماكينات أخرى شبيهة "identical machines" ربما قد تكون بمثابة أساس أو مرجعية جيدة.

١-٢- المقارنة بمحاور أخرى "other axes"

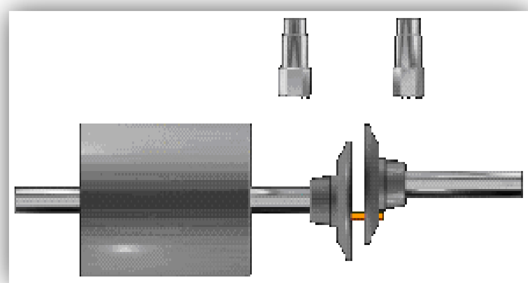
يمكنك أيضاً مقارنة البصمة من نقطة قياس من إحدى المحاور"axis" وليكن المحور العمودى أو الرأسى "vertical" بمحورآخر وليكن المحورالإفقى "horizontal". والماكينة تهتز فى ثلاث محاور (الرأس والأفقى والمحورى) والمقارنة بين المحاور الثلاثة يمكن أن تكشف عن مشكلة كبيرة جداً.

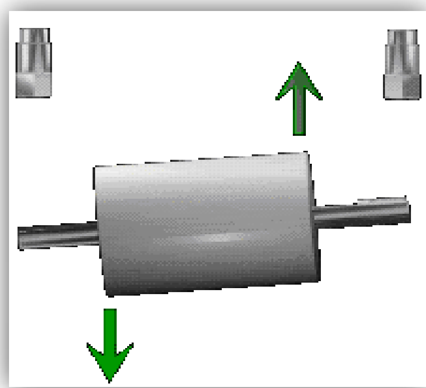
على سبيل المثال، إذا كان المحور الرأسي والمحور الأفقي على حد سواء لديهم سعة كبيرة في سرعة الدوران (1X)، فمن المحتمل جداً وجود مشكلة عدم الإتزان بالماكينة "out of balance".



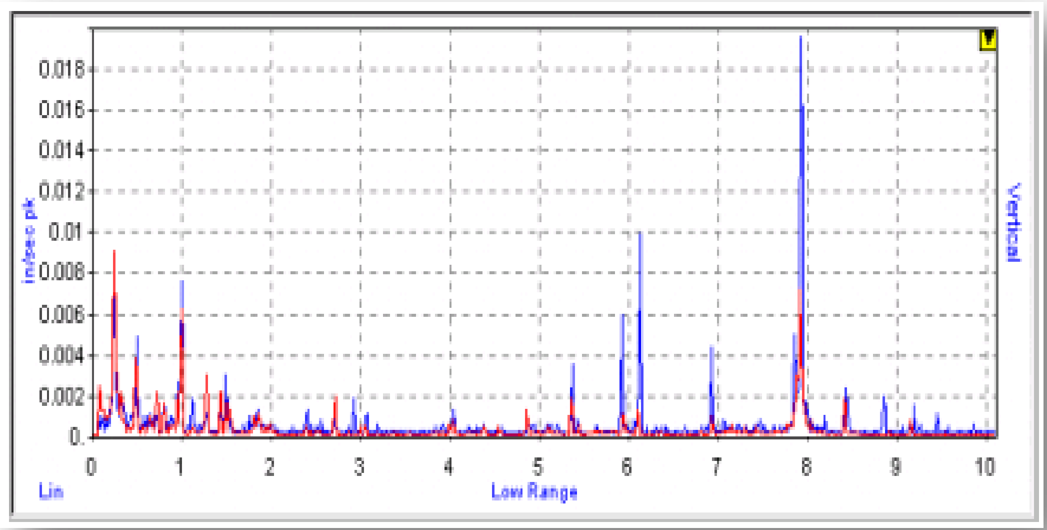
١-٣- المقارنة بأماكن مختلفة

أيضاً يمكنك المقارنة بين الإهتزازات من موقع "location" إلى آخر. فمثلاً لتشخيص عدم السنترة "misalignment" يجب أن نقارن شكل بصمة الإهتزازات (والطور"phase" إذا كان متاح) على جانبى الكوبلنج "across coupling".



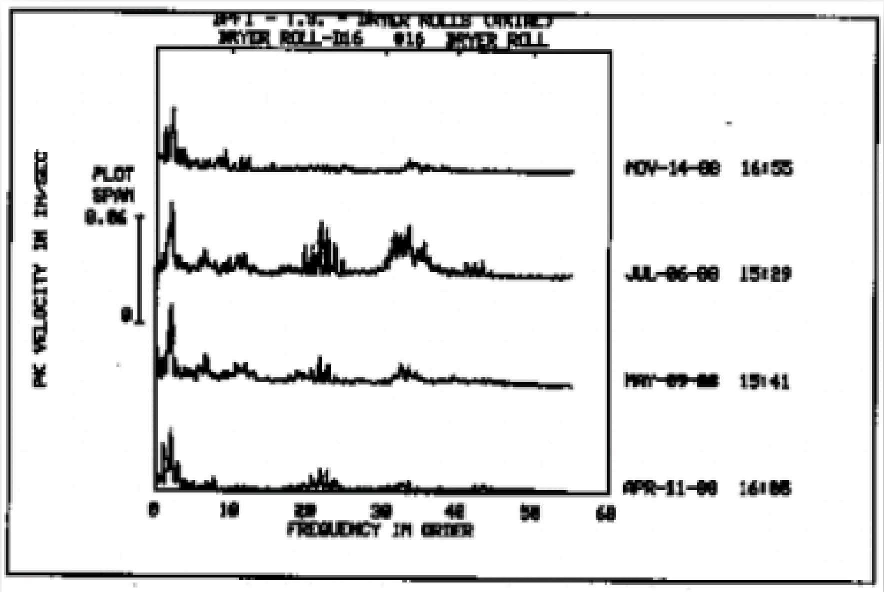


الرسم البياني القياسي المستخدم فى المقارنة حيث يتم وضع البصمات فوق بعضها البعض.



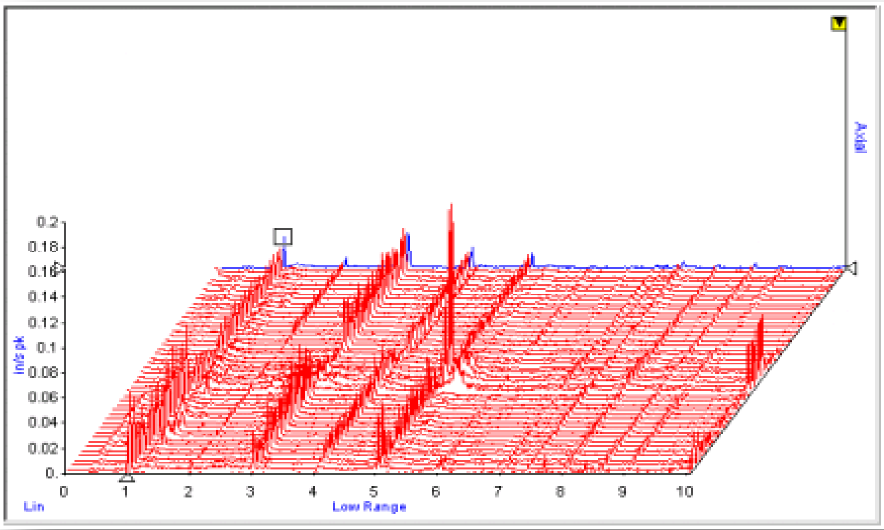
١-٤- المقارنة فى مصفوفة "stacked plots"

في بعض البرامج التي قد يعرض الرسم البياني البصمات مرصوصة "stacked graph" ولكنها منفصلة عن بعضها.



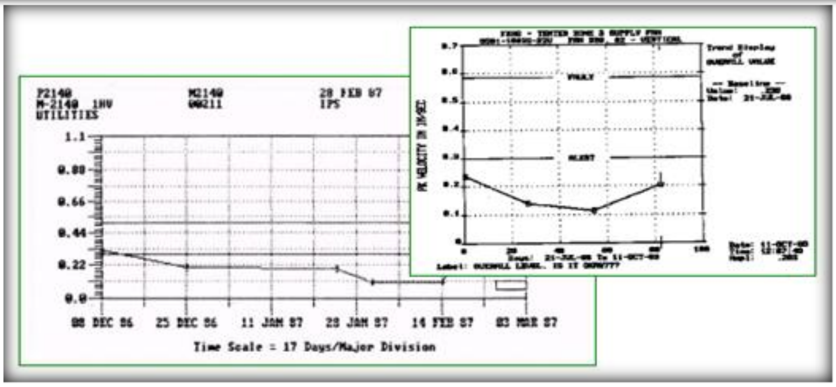
١-٥- المقارنة فى شلالات "waterfall plot"

طريقة أخرى شائعة جداً وهى العديد من البصمات وتسمى "waterfall plot".

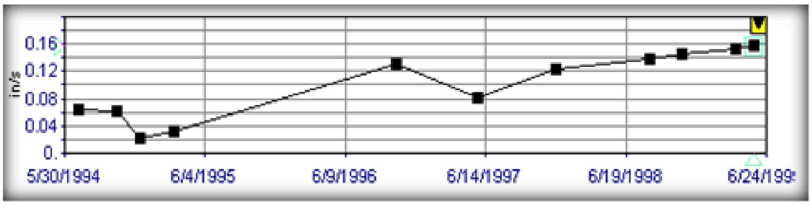


١-٦- مقارنة منحنى الإطراد "Trends"

منحنى الإطراد "Trends" هو أيضاً مفيد جداً حيث يتم مقارنة قيم المستوى العام التى تم أخذها حالياً مع القراءات السابقة وهذه المقارنة أكثر شيوعاً لمعرفة كيف يتغير المستوى العام للإهتزازات مع مرور الوقت. وأنها أيضاً عادةً ما تشير إلى مستويات الإنذار.



وبعض البرامج يمكنها أن تسمح لك بمقارنة مستوى السعة لترددات معينة، لنرى كيف يمكن أن يتغير مستوي تردد معين بمرور الوقت.



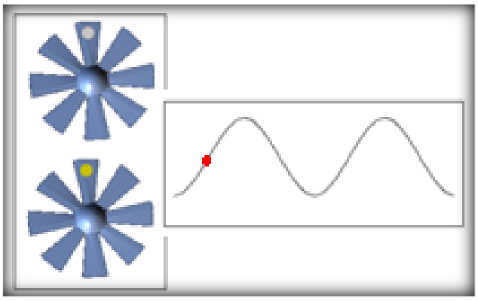
فى برامج أخرى من الممكن تحديد الترددات بنطاقات معينة "frequency bands" وعلى سبيل المثال أحد تلك النطاقات "bands" من المكن أن يمتد من (0.9X) إلى (1.1X)، للتركيز على مشاكل عدم الإتزان. ونطاق آخر من (1.9X) إلى (2.1X) للتركيز على مشاكل عدم السنترة. هذه البرامج أيضاً تسمح لعمل منحنى الإطراد "trend" لمستوى الإهتزازات خلال تلك النطاقات.

والهدف من ذلك هو كشف أى مشكلة إن وجدت ودراسة شكل البصمات لفهم طبيعة الأعطال ثم المقارنة ببيانات أخرى لمعرفة شدة أو خطورة المشكلة "severity" ومدى تغيرها. وكل هذا لكى تكون فى وضع يمكنك من عمل التوصيات اللازمة لحل تلك المشاكل "recommendation".

٢- فهم الطور "phase"

الآن نحن بحاجة لمعرفة المزيد عن الطور "phase".

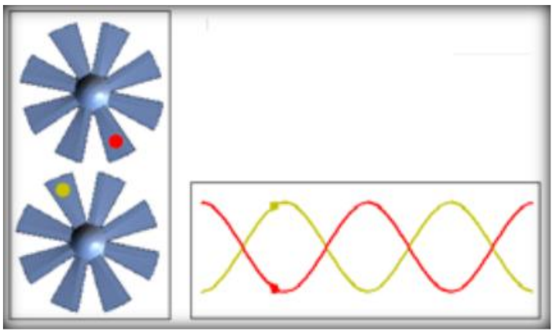
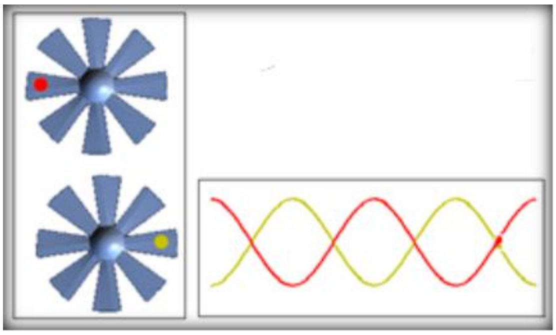
كما بالشكل مروحتان أحدهما عليها عملة ذهبية "gold coin" والأخرى عليها عملة من النيكل "nickel coin". ويتم وضع المروحتان بجانب بعضهما البعض، ويتم لف الريش يدويا بحيث تكون القطع المعدنية فى الجزء العلوى. ويتم لف المروحتان فى آن واحد. ونفترض أنهما مروحتان جيدتان وأن سرعتهما تسير بنفس المعدل "same rate".



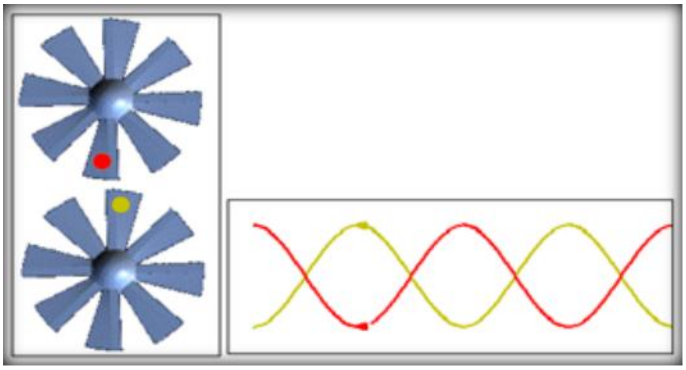
الآن ضع يدك اليسرى على إحدى المراوح ، ويدك اليمنى على الأخرى. يمكن أن تشعر بنبضتهما "both pulsating" على حد سواء. وكلاهما ينبضان معاً وكلاهما يصلان إلى القمة معاً "peak" وكلاهما ينبضان معاً كل ثانية. وفى هذه الحالة يقال أن المروحتان فى نفس الإتجاه "in-phase". أى عندما يحدث الحدثين فى نفس الوقت يقال عنهما "in-phase".

٢-١- الخروج عن التزامن "Out of synch"

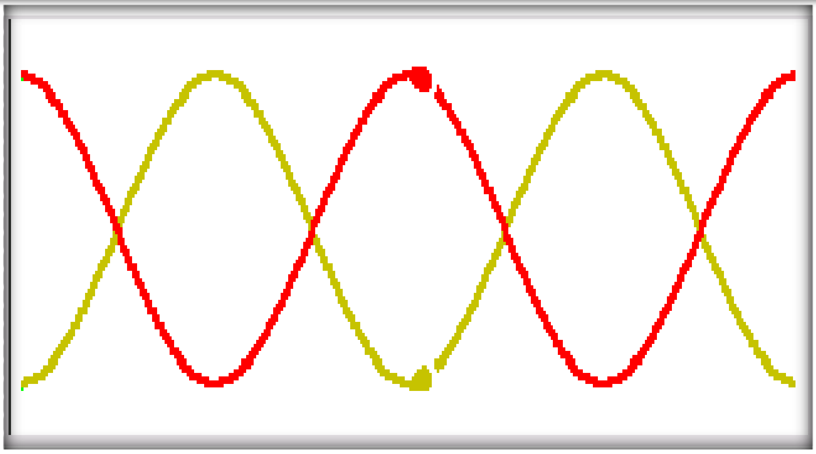
يتم إيقاف المروحتين ونأخذ المروحة الأولى ونلف الريش بحيث تكون العملة فى القمة "top". ونأخذ المروحة الأخرى ونلف الريش بحيث تكون العملة فى القاع "bottom". ويتم تشغيلهما فى نفس الوقت ووضع يديك على كل من المروحتين كما فعلت ذلك فى السابق. ما هو شعورك؟

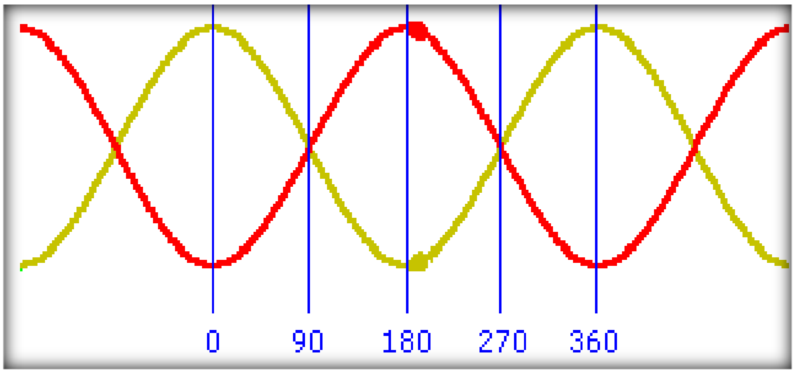
يجب أن تشعر أنهما لا يزالان ينبضان "pulsate" بنفس المعدل. وإذا نظرت إلى كل مروحة لا يزال بإمكانك أن ترى أن النبضة تتولد عندما تكون العملة عند أعلى نقطة (حيث يديك على الجزء العلوى من المروحة). لكن لا تنبضان فى نفس الوقت.



بإستخدام الجملس يمكن القول بأنه يوجد دائماً نبضة واحدة كل نصف ثانية (المروحتان مازالت تلف فى نفس الوقت مرة كل ثانية). وإذا رسمنا الإهتزازات لكل من المروحتين بيانياً وذلك بإستخدام اللون الأحمر للعملة الحمراء واللون الذهبى للعملة الذهبية، سوف نحصل على الآتى. سوف نرى مع هذا الرسم أن السعة هى نفسها السعة لم تتغير، والتردد كما هو نفسه، ولكنه يوجد هناك فرق فى التوقيت.

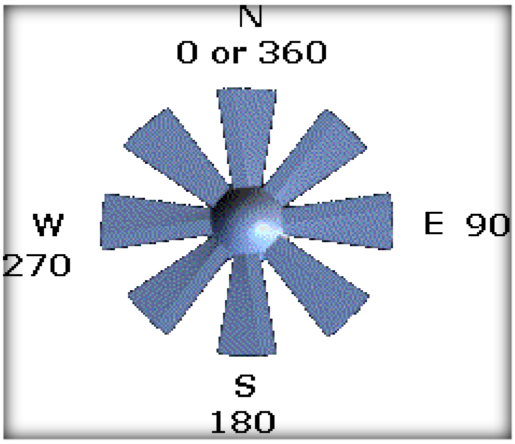


ويقال عن المروحتين ١٨٠ درجة "out-of-phase". وإذا أخذنا الموجة الجيبية الذهبية وسميناها الموجة المرجعية أو الأساسية "reference" وأمكننا تقسيم السيكل (٣٦٠ درجة) إلى فترات متساوية. كل فترة فى الحقيقة ٩٠ درجة من الدوران. وإذا نظرنا إلى القمة "peak" للموجة الثانية (الحمراء)، نجد أنها تصل إلى القمة "peak" بعد ١٨٠ درجة من الموجة الأولى.

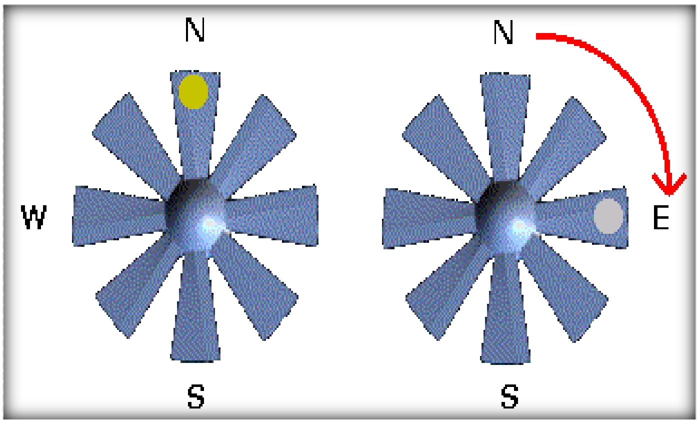


٢-٢- إستخدام البوصلة "compass"

وإذا تعاملنا مع وجهة المروحة مثل البوصلة يمكننا أن نرى أيضاً عندما تكون العملة للمروحة الأولى (الذهبية) فى الشمال "North" تكون العملة للمروحة الثانية (الحمراء) ١٨٠ درجة بعيداً فى الجنوب "South".



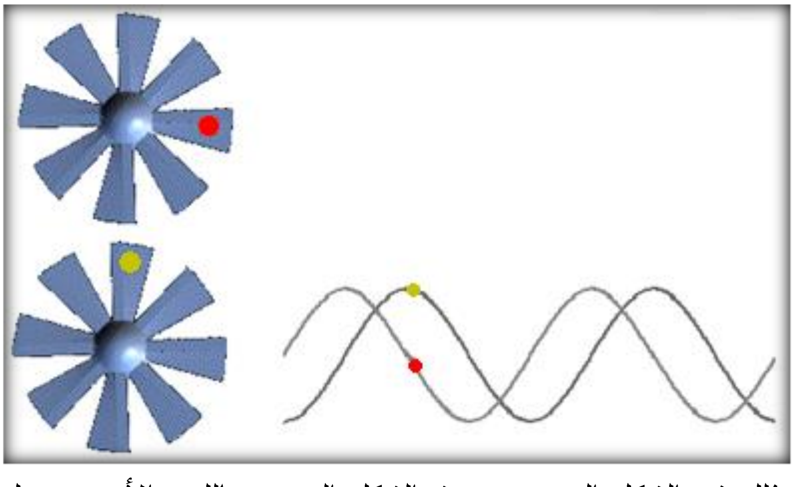
دعونا نكرر المثال، إذا كنت تواجه الجزء الأمامى من المروحة، دعنا نضع العملة (الذهبية) للمروحة الأولى فى أعلى (شمال، أو ٠ درجة)، ونضع العملة (النيكل) للمروحة الثانية عند ٩٠ درجة أو الشرق. وللعلم المروحتان تدور فى إتجاه عقارب الساعة ونحن ننظر إليها من الأمام.



قم بتشغيل المروحتان وإبدأ بالإحساس بهما ماذا تشعر؟ هل لاحظت المروحة الثانية (العملة الذهبية)، عندما تتحرك المروحة الأولى وتكون العملة (النيكل) عند ٩٠ درجة تصل إلى ذروة النبضة "peak" قبل أن تصل المروحة الثانية إلى الذروة. أى أن المروحة الأولى تصل إلى الذروة قبل المروحة الثانية بربع ثانية لأنها تسبقها بمقدار ٩٠ درجة، وذلك لأنها عندما تكون العملة (النيكل) فى الوضع الشمالى "North" تكون عملة المروحة الثانية (الذهبية) خلفها فى الغرب "West" حيث أن المراوح تدور فى إتجاه عقارب الساعة "clockwise".

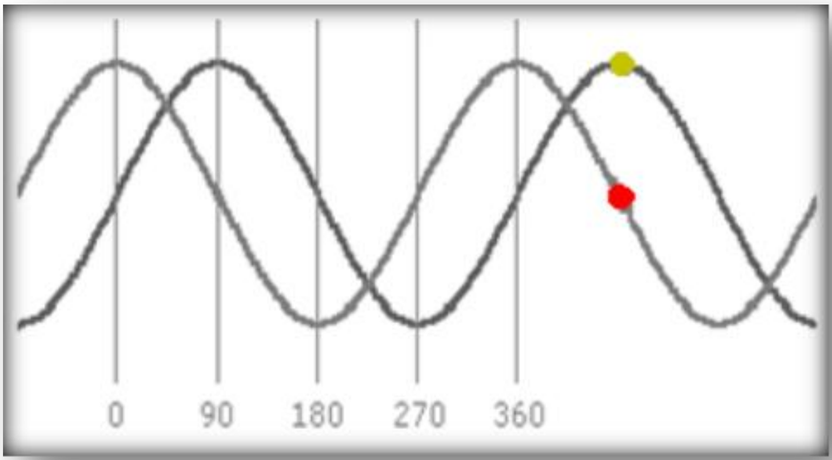
<u>٩٠ درجة خارج الطور "90 degrees out of phase"</u>

إذا رسمنا الموجتان الجيبيتان مرة أخرى نجد أن القمم تكون قريبة من بعضها هذه المرة. فهما حدثان لا يحدثان فى نفس الوقت والفرق بينهما ٩٠ درجة "out of phase"، ولكن هذه المرة المروحة الثانية (العملة الحمراء) تسبق المروحة الأولى (العملة الذهبية) بمقدار ٩٠ درجة.



ويمكنك أن ترى ذلك فى الشكل الموجى. حيث الشكل الموجى باللون الأحمر يصل إلى الذروة قبل الشكل الموجى باللون الذهبى. أو بمعنى آخر المروحة ذات العملة النيكل (الآن اللون الأحمر لكى

نستطيع تمييزها) تسبق "lead" المروحة ذات العملة الذهبية بمقدار٩٠ درجة. ويمكن التعبير بطريقة أخرى بأن تقول أن المروحة ذات العملة الذهبية تتأخر "lag" عن المروحة ذات العملة النيكل بمقدار ٩٠ درجة.



٢-٣- أهمية الزمن فى الطور "phase"

فى الأمثلة السابقة إعتبرنا أن الطور "phase" يحدث عند تردد واحد فقط وهو سرعة الدوران. وفى الحقيقة أن معظم عملنا فى تحليل الإهتزازات يعتمد فقط على معرفة "phase" عند سرعة الدوران. وعادةً ما نجد حدثان "events" يحدثان فى نفس الوقت فيقال عنهما "in phase" أو حدثان بينهما ١٨٠ درجة يقال عنهما "out of phase" أى حدث يحدث عند الإتجاه المعاكس للسيكل.

٢-٤- الطور "phase" هو أداة تشخيصية مهمة "diagnostic tool"

نحن نستخدم الطور "phase" لتشخيص وتحليل مشاكل الماكينات مثل عدم الإتزان "imbalance" (مثل المروحة التى لدينا)، عدم السنترة أو عدم ضبط المحاور "misalignment"، إنحناء العمود "bent shaft" والعديد من العيوب الأخرى. يمكننا أيضاً إكتشاف الرنيين "resonance" ومشاكل مرونة الأرضيات "foundation flexibility" مع الطور "phase"، ويستخدم كذلك فى عملية الإتزان – وسيتم تغطية ذلك فى جميع الأقسام الأخرى.

- النهاية -

الباب الرابع

قياس الإهتزازات

Measuring vibration



أقسام الباب الرابع

١- القسم الأول : قياس سعه الإهتزازات
٢- القسم الثانى : الضمانات اللازمة لصحة قياس الإهتزازات
٣- القسم الثالث : جمع بيانات الإهتزازات
٤- القسم الرابع : المخطط العام لقياس الإهتزازات

مقدمه فى قياس الاهتزازات :-

قياس الإهتزازات هو أهم جزء من برنامج تحليل الإهتزازات. وبدون بيانات جيدة، لايمكن أن تتوقع نتائج جيدة. وهناك أسباب وجيهه عندما يقول الناس "إذا أدخلنا زبالة أخرجنا زبالة" "Garbage in garbage out".

ولضمان جمع بيانات جيدة يجب التأكد من إستخدام جهاز إستشعار مناسب "transducer"، ويثبت بشكل صحيح. وكذلك التأكد من تنفيذ القياس بنفس الطريقة فى كل مرة حيث أن التكرار أمر ضروري "Repeatability is essential".



وللتأكد من حصولك على أفضل قياس ممكن:-

الخطوة الأولي هي التأكد من إستخدام جهاز إستشعار مناسب "transducer" ويثبت بشكل صحيح. عليك الإختيار بين الإزاحة "displacement" والسرعة "velocity" والعجلة "acceleration". وقضايا مثل سرعة الماكينة ونوع رولمان البللى ستدخل فى الإعتبار فيما بعد.

ويجب معرفة نوع اللاقط الذى ينبغي أن يستخدم لكل ماكينة، ومعرفة كيفية ومكان التركيب. بالنسبة إلى معظم الناس، يكونوا فى حاجة إلى لاقط فقط أو إثنين، وطريقة التركيب تكون موحدة بقدر الإمكان. ولكن إذا كان لديك ماكينات ذات سرعات عالية أو سرعات منخفضة، وإذا كان لديك ماكينات تعمل فى بيئات خطرة، وإذا كان لديك تربينات أو ماكينات أخرى تعمل على سبائك كراسى التحميل "Journal bearings"، فإنك قد تجد نفسك محتاج إلى مجموعة أكبر من اللواقط وأنماط تثبيت مختلفة. حجم ونوع واحد لا يناسب الجميع.

الخطوة التالية هو تحديد النموذج المناسب لبيئة القياس. علينا أن ننظر في درجة حرارة التشغيل، والفراغات حول الماكينات، وجود الماء أو السوائل الأخرى، وغيرها من العوامل.

وبعد ذلك علينا أن ننظر إلى أساليب تركيب اللاقط "mounting techniques"، نوع الماكينة، وطبيعة سطح الماكينة والعوامل البيئية الأخرى، ومدى التردد المطلوب "frequency range"

والمسائل المتعلقة بإمكانية الوصول تكون مهمة. يجب دراسة الماكينة بعناية والتأكد من إمكانية تحديد أفضل الأماكن للواقط القياس "transducer".

الآن يجب مراعاة القياسات الروتينية "routine measurements" للماكينات. لابد أن يتم القياس فى كل مرة بنفس الطريقة. الماكينة يجب أن تعمل بنفس الحمل ونفس السرعة كما فى المرة السابقة.

اللاقط يجب أن يثبت فى نفس المكان ونفس الطريقة كما بالمرة السابقة. وفى هذه الحالة سيكون الإختلاف الوحيد هو نمط أو شكل الإهتزازات "vibration pattern" الفعلى للماكينة.

وبينما كنت بجوار الماكينة، لاتنسى أن تبقى عيناك وآذانك مفتوحة! هل تعلم أن أحد فوائد تطبيق نظام مراقبة حالة الماكينات الدوارة هو أن شخصاً ما يزور الماكينة وعينه على تشغيلها. سوف يفاجأ بما قد يجد.

بمجرد أن يتم جمع البيانات لبعض الوقت، وأنت تعلم أنها يجب أن تكون متكررة. يجب أن تعطى بعض التفكير فى لاقط القياسات الذى تستخدمه. فمن الممكن لأفضل لواقط القياس أن يفشل فى القيام بوظيفته أو يكون خارج المعايرة "out of calibration". وينصح بشدة بمعايرته سنوياً.

القسم الأول:- قياس سعة الإهتزازات

مقدمه :- الوصف اللفظى والعددى لإهتزازات الماكينة

لتحليل وتشخيص حالة الماكينة "condition" نحتاج أولاً لوصف سلوك "behavior" أو أعراض "symptoms" الماكينة بكل دقة وتعتمد فى المقام الأول على كيفية وصف القائم بتحليل الإهتزازات "vibration analysts" لحالة الماكينة.

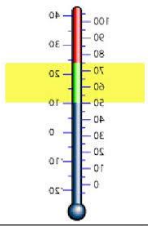
من خلال المشاهدة "watching" والشعور "feeling" والاستماع "listening" إلى إهتزازات الماكينة يمكننا في بعض الأحيان تقريباً تحديد حدة أو خطورة "severity" مشكلة الإهتزازات.

قد نلاحظ فى بعض أنواع الماكينات أن الإهتزازات تظهر بصورة خشنة "rough" والبعض ملحوظ "noticeable" وبعضها الآخر يمكن إهمالها "negligible".

يمكننا أيضاً لمس كراسى التحميل لرولمان البللى والإحساس بسخونتها "hot" أو سماع الضوضاء "noisy" ومن هنا يمكننا أن ندرك أن شئ ما خطأ "something is wrong".

وصف إهتزازات الماكينة بهذه الطريقة العامة غير دقيق ويعتمد على تقييم "assessment" الشخص نفسه. وما قد يبدو صعباً أو خشناً "rough" لشخص واحد يبدو مقبولاً إلى آخر. وعادةً الوصف اللفظى "Verbal" لا يمكن الاعتماد علية "unreliable".

ولتحليل مشكلة الإهتزازات بدقة من الضرورى وصف الإهتزازات بطريقة متسقة وموثوق بها ومحللوا الإهتزازات "vibration analysts" يعتمدون فى المقام الأول على الأوصاف العددية بدلاً من التركيز على الأوصاف اللفظية لتحليل الاهتزازات بدقة والتواصل بشكل فعال.

فمثلاً درجة الحرارة وصف عددي لحرارة الجسم فمثلاً درجة حرارة جسم أعلى من ٣٦.٩ درجة مئوية وهذا الإرتفاع فى درجة الحرارة ربما يشير إلى إلتهاب فيروسي.	
والسعة والتردد وصف عددي للإهتزازات فمثلاً عضو دوار "rotor" تحتوى بصمة إهتزازه على سعة عالية (قمة) "peak" عند تردد مطابق لسرعة الدوران "rotating frequency" وهذا الإرتفاع فى مستوى الإهتزاز يشير ربما إلى عدم إتزان العمود الدوار "rotor imbalance".	

فالقيم العددية لكل من السعة "amplitude" والتردد "frequency" هما أكثر أهمية وتعبيراً للوصف العددى لإهتزازات الماكينات.



١– قياس سعة الإهتزازات "measuring amplitude"

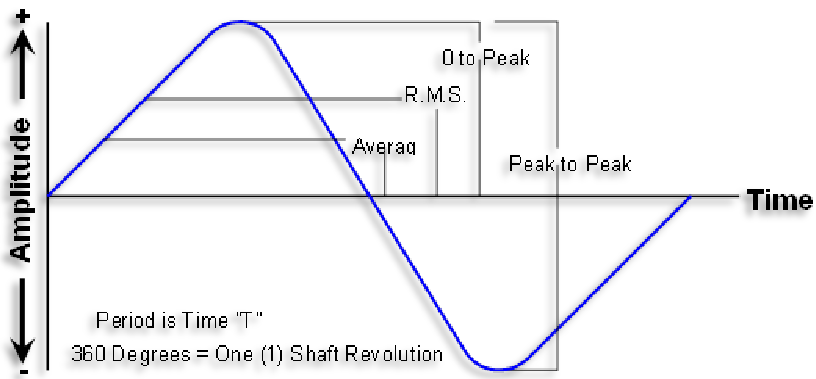
الإهتزازات ماهى إلا سعة وتردد وهى سلوك الأجزاء الميكانيكة للماكينة عندما تتعرض لقوى خارجية أو داخلية. والإهتزاز لا يحدث إلا بوجود طاقة كبيرة كامنة بالجسم لا يستطيع أن يصرفها ولا يتخلص منها وهذه الطاقة تثير الجسم وتجعله يهتز (بسعه وتردد). والسعه والتردد هما عنصران مهمان لإشارة الإهتزاز. حيث طاقة الإهتزاز تساعد على نمو السعه "amplitude" وكلما زادت زاد تبعاً لها سعة الإهتزازات وزادت المشكلة. حيث أن السعة تظهر حدية العطل "severity" وليس لها دخل بالتردد. أما التردد (معدل تكرار إهتزاز جزء ما) فإنه يبين منبع الإهتزازات ويساعد كثيراً على التعرف على أسباب الإهتزاز ومواضع الخلل.

والسعة والتردد كلاهما يوفران أساساً لمعرفة أو تحديد السبب الجزرى للإهتزازات "root cause".

والماكينة التى سعة إهتزازاتها عالية إما أن تكون حجمها كبير أو ذو سرعة دوران عالية أو ذات حركة إهتزازية عنيفة نتيجة للقوة المصاحبة لها مثل (مشاكل عدم الإتزان أو عدم السنترة .....الخ). وكلما كبرت سعة الإهتزازات كثرت الإجهادات "stress" على الماكينة وتكون أكثر عرضةً للإنهيار "damage".

هناك إختيارات مختلفة يمكن إستخدامها أثناء القياسات للتعبير عن سعة الموجة " amplitude of the wave" مثل (المتوسط "average" – مربع الجذر التربيعى "RMS" – القمة "peak" – من القمة إلى القمة "pk-pk").

والشكل الآتى يبين موجة جيبية نقية حيث أن محور X يمثل الزمن ويكون وضع السكون عند الصفر وهو الوضع الإساسى.



١-١- قياس السعة بإختيار القمة "peak"

وتختصر "pk" وتحسب قيمة السعة المقاسة من وضع السكون (0) إلى القمة "peak" أى من الصفر إلى القمة. وتعرف "peak value" بأنها أقصى قمة للإهتزاز "peak" تتحقق "achieved" بواسطة الماكينة خلال فترة زمنية معينة.

١-٢- قياس السعة بإختيار القمة إلى القمة "pk-pk"

وتحسب قيمة السعة المقاسة من وضع قيمة القمة (+ peak) إلى وضع قيمة القمة (- peak).

١-٣- قياس السعة بإختيار مربع الجذر التربيعي "RMS"

وتحسب قيمة السعة المقاسة تحت المنحنى للموجة الجيبية من وضع السكون (0) الى قيمة القمة (peak) ثم العودة إلى وضع السكون (0).

قيمة السعة المقاسة تحت المنحنى للموجة الجيبية من وضع السكون (0) الى قيمة القمة "peak" ثم العودة إلى وضع السكون، ويرمز له "RMS" وهو السعة لموجة معقدة (أي مشوهة) ويتم حسابها بأخذ متوسط الجذر التربيعي لمربع القيمة وهذه الطريقة تكون مفيدة وأكثر دقة لحساب كمية الطاقة للموجة وخاصة عندما تتنوع القيم إلى موجبة وسالبة.

وطاقة الموجة تساوى المساحة تحت المنحنى والمساحة تحت الجزء الموجب للمنحنى يكون موجباً (فوق خط الصفر) والمساحة تحت الجزء السالب للمنحنى يكون سالباً (تحت خط الصفر).

إذا قمنا بجمع هاتين المساحتين ستكون المحصلة صفر حيث أن نصف الموجة موجباً والآخر سالباً وإذا أردنا الحصول على قيمة غير الصفر نقوم أولاً بتربيع كل قيمة على المنحنى على جانبى خط الصفر أى قيمة نصف منحنى الموجة الموجب مضافاً إليها قيمة منحنى الموجة السالب. أى أننا فى هذه الخطوة قمنا بتربيع قيم المنحنى فى الإتجاهين السالب والموجب ويقال هنا أننا ربعنا الموجة أى "S" من "RMS" (the S in RMS).

الآن يمكننا أن نضيف المساحات معاً حيث أنها كلها موجبة وبعد ذلك نحصل على المتوسط "mean" للمنحنى بالقسمة على الفترة الزمنية ويقال هنا أننا أخذنا المتوسط أى "M" من "RMS" (the M in RMS).

وأخيراً، حيث أن جميع المساحات هي مربع لتلك الموجة الأصلية ويقال هنا أننا ربعنا الموجة " we squared the wave" ونحن بحاجة إلى اتخاذ الجذر التربيعي للمتوسط ويقال هنا جزر "R" من "RMS" (R in RMS).

وفى حالة الموجات الجيبية النقية قيمة السعة فى حالة متوسط الجزر التربيعى للقيم "RMS" تساوى ٠.٧٠٧ من قيمة "Peak".

أما فى حالة الموجات الجيبيية المعقدة تكون "RMS" مختلفة عن القيمة السابقة.

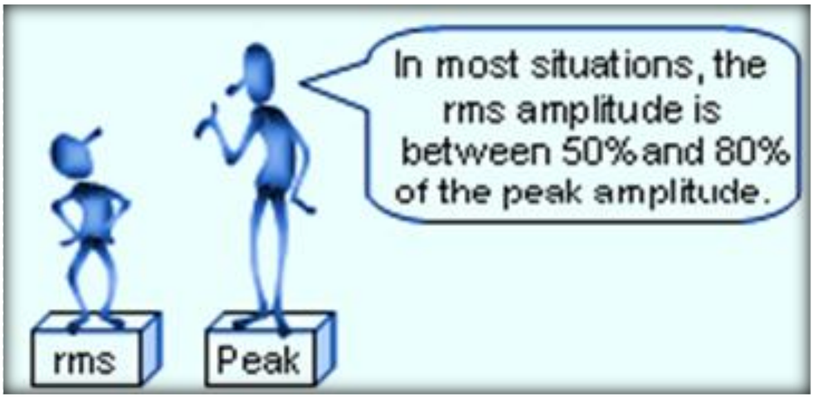
ويحسب متوسط الجزر التربيعى للسعة "RMS" للموجة الجيبية النقية كالآتى:-

متوسط الجزر التربيعى للسعة "RMS" = Peak Value × ٠.707

ويمكن القول بأن السعة "Peak" > السعة "RMS" بمقدار 1.414 مرة.

ولذلك من المهم جداً أن نعلم أى نوع من السعة تم إختيارها وأى قيمة للسعة كنا نقرأ.

من المفيد أن نتذكر دائما أن السعة "RMS" هى دائماً أقل بنسبة تتراوح بين ٥٠-٨٠ % من السعة "peak".



١-٤- قياس السعة بإختيار المتوسط (Avg)

وتحسب قيمة السعة المقاسة لمتوسطات قيمة القمة "peak" للموجة الجيبية.

وفيه يتم أخذ المتوسط الحسابى للموجة ويرمز له "Avg" ويمكن حسابه بأخذ عينات من نقاط عديدة على موجة وأخذ متوسط هذه العينات (جمع قيم جميع العينات المراد إيجاد متوسطها ويقسم مجموعها على عددها).

وكما هو معلوم جزء من الموجة موجباً والجزء الآخر سالب ولتجنب هذا يتم تصحيح "Rectified" لشكل الموجة أى جعلها موجبة قبل أخذ المتوسط لقيمة السعة.

ويحسب متوسط قيمة السعة المقاسة لمتوسطات قيمة القمة "peak" للموجة الجيبية كالآتى:-

متوسط السعة "Avg" = Peak Value × ٠.637

الخلاصة:-

ويمكن حساب قيم السعات المختلفة إذا علم قيمة إحداها كلآتى :-

RMS = 0.707 * Peak
Avg = 0.637 * Peak
Pk-Pk = 2 * Peak

٢- طرق قياس السعة فى الصناعة

يوجد ثلاثة طرق لقياس السعة فى الصناعة على النحو التالى:-

٢-١- سعة الإزاحة "Displacement amplitude"

بواسطتها يمكننا قياس مسافة حركة العمود "shaft" بالنسبة إلى نقطة مرجعية "reference point" وعادةً ما نرغب فى معرفة الحركة الإجمالية للعمود. ويتم إختيار نوع القياس (P-P) لأنها تمثل الحركة الفعلية للمشوار كله وليس متوسط المشوار ويتم إختيارها فى حالة السرعات المنخفضة (إهتزاز المبانى – المواتير المنخفضة السرعة) ووحداتها مللز "Mils".

٢-٢- سعة السرعة "Velocity amplitude"

بواسطة سعة السرعة "Velocity amplitude" يمكننا قياس الإذاحة "displacement" لحركة العمود "shaft" بالنسبة إلى الزمن وعادةً ما نفكر فى السرعة القصوى أثناء قيادة السيارة وفى قياس الإهتزازات نفكر فى السرعة القصوى.

وتستخدم فى الماكينات ذو السرعات المتوسطة. ويمكن التعبير عن سعة السرعة " Velocity amplitude" بكميتين هما إما متوسط مربع الجذر التربيعى "RMS value" أو "peak value" ووحداتها ملليمتر/ثانية "mm/s".

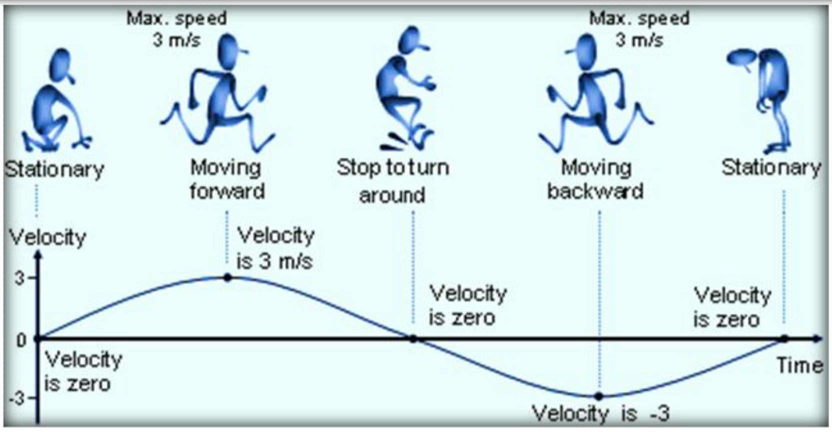
ويتم إختيار "RMS" لأنه هو المقياس الأكثر شيوعاً لقياس إهتزازات الماكينات فى مدى واسع للتردد "10-1000Hz" ولأنها أحسن معبر عن الإهتزاز حيث يتم تربيع السرعة (V) وعادةً ما يكون مربع سرعة الإهتزاز أحسن معبر عن طاقة الحركة (Kinetic energy = ½ mv2). ويتم إختيارها فى حالة السرعات المتوسطة وفى الظروف العادية والتى بها مشاكل ميكانيكية مثل (عدم الإتزان – عدم محورية الأعمدة – التفكك الميكانيكى ....إلخ)

٢-٣- سعة العجلة "Acceleration amplitude"

بواسطة سعة العجلة "Acceleration amplitude" يمكننا قياس القوة الكلية "total force" اللازمة لتحريك عنصر الإهتزاز "vibration element" فى الإتجاه المعاكس. ويتم إختيار نوع القياس "RMS" لأنها تعبر أحسن تعبير عن مستوى الطاقة ويتم إختيارها فى حالة السرعات العالية والصدمات "impact forces" مثل (التروس – رولمان البللى) ووحداتها الجيز "G's".

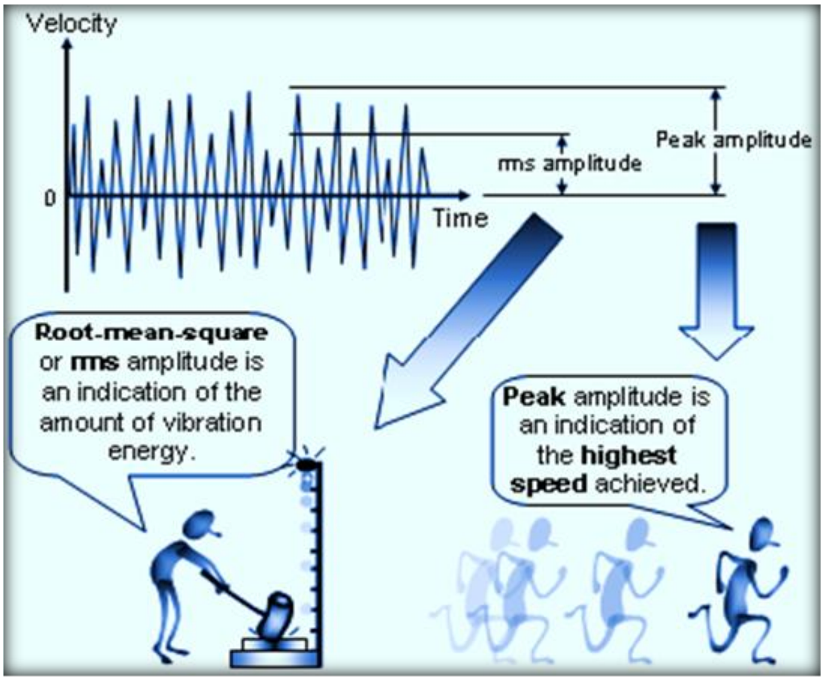
٢-٤- أهمية إستخدام سعة السرعة "velocity amplitude" للماكينة

سعة السرعة "velocity amplitude" للماكينة والمحسوبة على أساس الجذر التربيعى لمتوسط مجموعات المربعات "RMS" تعطى معلومات مفيدة للغاية عن حالة الماكينة وتقاس في إتجاه معين "particular direction" كما هو موضح بالرسم البيانى الآتى.



ولقد أثبتت التجربة والخبرة المكتسبة على العديد من الماكينات المختلفة أن القيمة الفعلية لسرعة الاهتزاز "velocity amplitude" والمحسوبة على أساس الجذر التربيعى لمتوسط مجموعات المربعات "RMS" هى أفضل مؤشر لعنف الاهتزاز إذا ما قورنت بقيمة التسارع (العجلة) أو الانتقال الناتج عن هذه الاهتزازات.

وتستعمل القيمة الفعلية للسرعة كمعيار لتقدير مفعولية الماكينة وسلامة الأشخاص العاملين عليها في بلاد مختلفة من العالم ، ولقد نظمت جداول عالمية لتحديد القيمة النمطية لهذه السرعات في مختلف الظروف ومختلف أنواع الماكينات وتمثل مقادير عنف الاهتزاز المقبول لأنواع مختلفة من الماكينات حسب نظام هيئة التوحيد القياسى العالمى رقم ٢٣٧٢ لسنة ١٩٧٤ م وهيئة القياس الهندسي الألمانى رقم ٢٠٥٦ وهيئة توحيد القياس البريطانى رقم ٤٦٧٥ لسنة ١٩٧١ م.



٣- العلاقة بين السعات المختلفة (الإزاحة، السرعة والعجلة) "amplitude relationship"

العلاقة بين كل من الإزاحة والسرعة والعجلة لإهتزاز الموجة الجيبية "sinusoidal" حيث يوجد إرتباط مباشر بين الثلاثة أنواع من القياسات المستخدمة لعرض السعة وكل واحدة منسوبة إلى الأخرى.

والرسوم التوضيحية الآتية توصف العلاقة المتبادلة بين الأنواع الثلاثة للقياس عند تثبيت إحداها وسوف تساعدك هذه المعلومات في تحديد أي نوع من اللواقط يمكن إستخدامه في تطبيق معين.

الرسم البيانى يبين العلاقة بين الإزاحة والسرعة والعجلة لمستوى ثابت للإهتزازات ٠.١ (IPS).

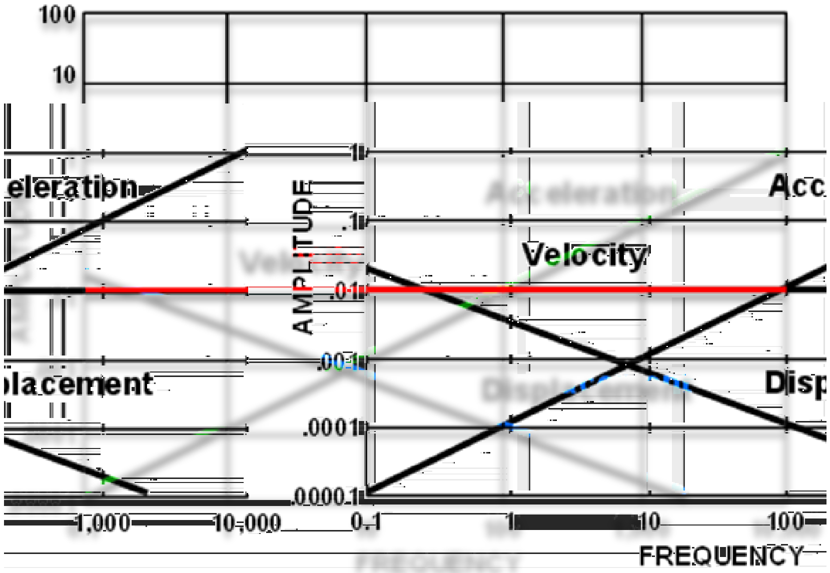
لاحظ أن محورى X وY مرسومان بالمقياس اللوغاريتمى (log- arithmetic) ومحور Y يشير إلى مستوى الإهتزازات ومحور X يشير إلى التردد.

والمنحنى يشير إلى إلى أنه عند التردد المنخفض تتولد كمية قليلة جداً من عجلة الإهتزازات، فى حين تتولد سعة إزاحة أكبر من ذلك بكثير. والعكس هو الصحيح فى الترددات العالية.

وهذا يدل على أن السرعة لها إستجابة جيدة على طول نطاق التردد بأكمله (تذكر أن جميع أجهزة الإستشعار لها حدود مادية وإلكترونية وتحتاج إلى تثبيتها بالشكل الصحيح).

كما ذكرنا سابقاً، يمكننا أيضاً أن نرى أن العجلة ليست مناسبة لقياس التردد المنخفض، والإزاحة ليست مناسبة لقياس الترددات العالية.

٣-١- عند تثبيت السرعة "Velocity"



ماكينة بسرعة ثابتة تعانى من زيادة العجلة وإنخفاض الإزاحة عند زيادة التردد كلآتى:-

مع زيادة التردد تنخفض الإزاحة وتزداد سعة العجلة "Acceleration" بشكل ملحوظ بعد 100 Hz تقريباً.

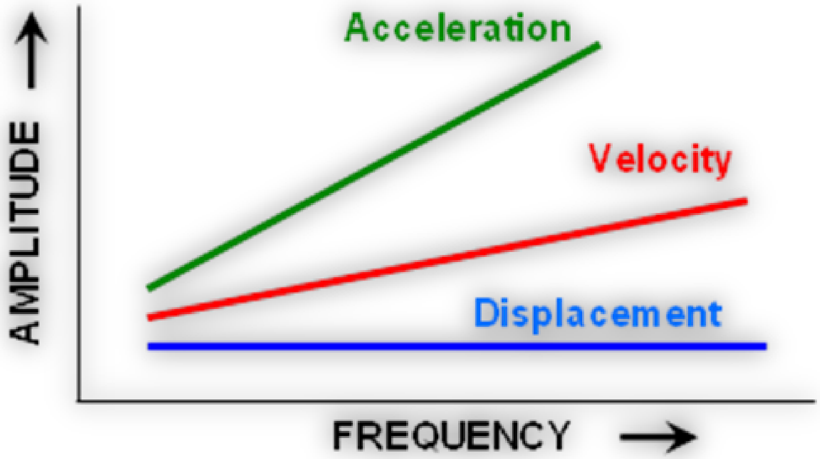
وبذلك يكون الإختيار المنطقى لمراقبة أجزاء الماكينة التى تولد ترددات عالية مثل رولمان البللى والتروس وريش التربينات أو الضواغط هو إستخدم لواقط لها حساسية كبيرة للترددات العالية.

وبالتالى نوصى بإستخدام وحدة العجلة "acceleration units" فى السرعات العالية والذى ينتج عنها ترددات عالية.

ونلاحظ أن سعة الإزاحة تنخفض إلى سعة صغيرة جداً فوق 100 Hz تقريباً.

ولهذا السبب نادراً جداً ما نستخدم وحدة الإزاحة "Displacement unit" فى حالة الماكينات ذات السرعات المتوسطة والعالية ولكنها مفيدة أكثر فى مراقبة الماكينات ذات السرعات المنخفضة أو رصد إهتزاز الهياكل العمرانية ومحركات الديزل.

٣-٢- عند تثبيت الإزاحة "Displacement"

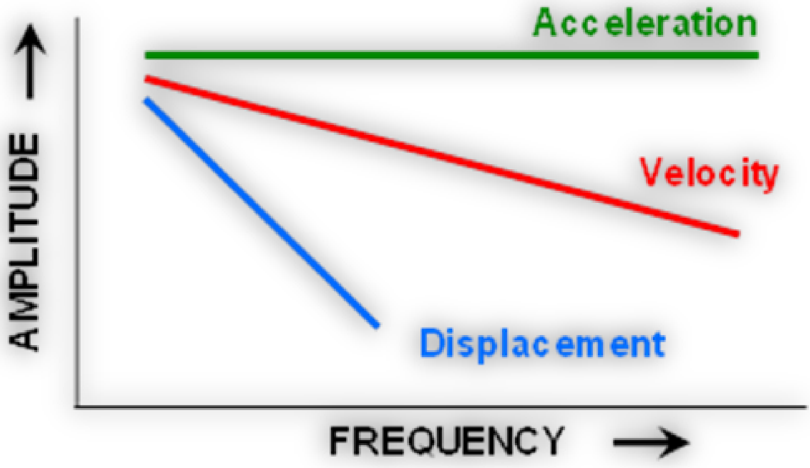


ماكينة بإزاحة ثابتة تعانى من زيادة كل من سعة العجلة "acceleration amplitude" وسعة السرعة "Velocity amplitude" عند زيادة التردد.

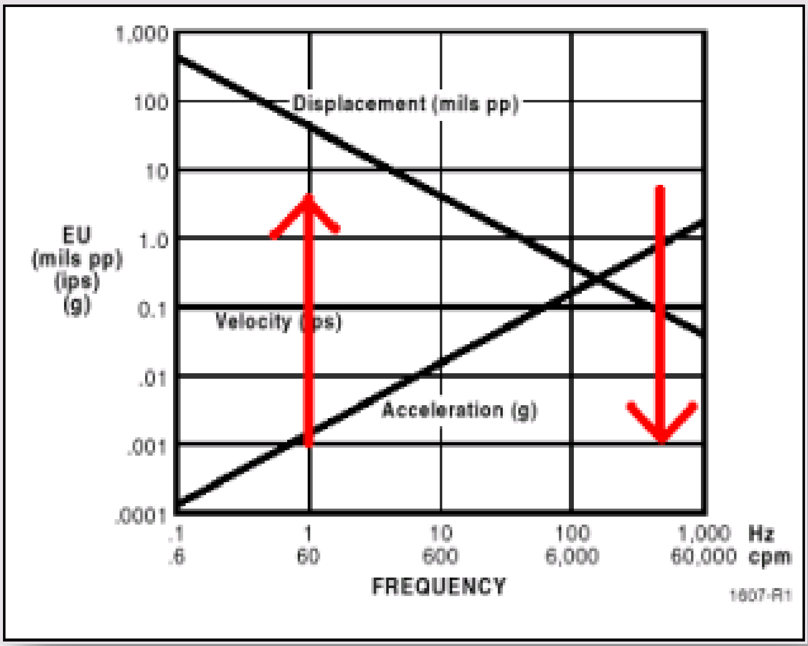
وبذلك نوصى بإستخدام سعة السرعة "Velocity amplitude" عند سرعة التشغيل العادية "normal operating" والتى يتراوح مداها من ٢ إلى ٢٠٠ Hz لمعظم المعدات والماكينات المستخدمة فى الصناعة. حيث تحتوى بيانات السرعة كما بينا من قبل على أفضل مؤشر عن حالة المعدات لما لها من مدى واسع للترددات ولهذا السبب تعتبر المقياس العالمى لتقييم سلامة الماكينة فيما يتعلق بالإتزان "balance" والتربيط "tightness" وعدم المحاذاة "alignment" وما شابه ذلك.

٣-٣- عند تثبيت العجلة "Acceleration"

ماكينة بعجلة ثابتة تعانى من إنخفاض سعة الإذاحة "Displacement amplitude" وسعة السرعة "Velocity amplitude" عند زيادة التردد.

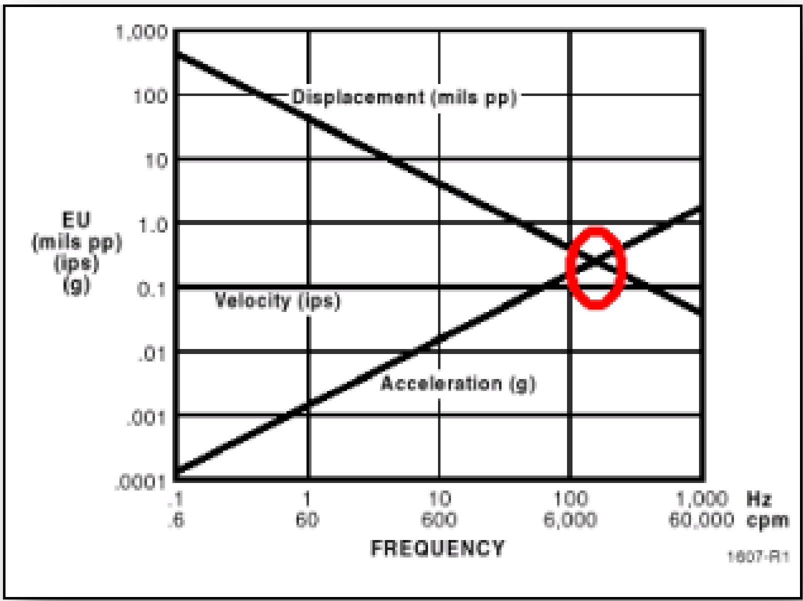


٣-٤- تأثير عملية التكامل على سعة الإهتزازات



هذا المخطط يوضح أيضاً ماذا يحدث للقياسات عندما تحدث عملية التكامل "integrated" من العجلة إلى السرعة أو من السرعة إلى الإزاحة.

سعة الإهتزازات للترددت المنخفضة تزداد فى حين أن سعة الإهتزازات للتردد العالية تقل.

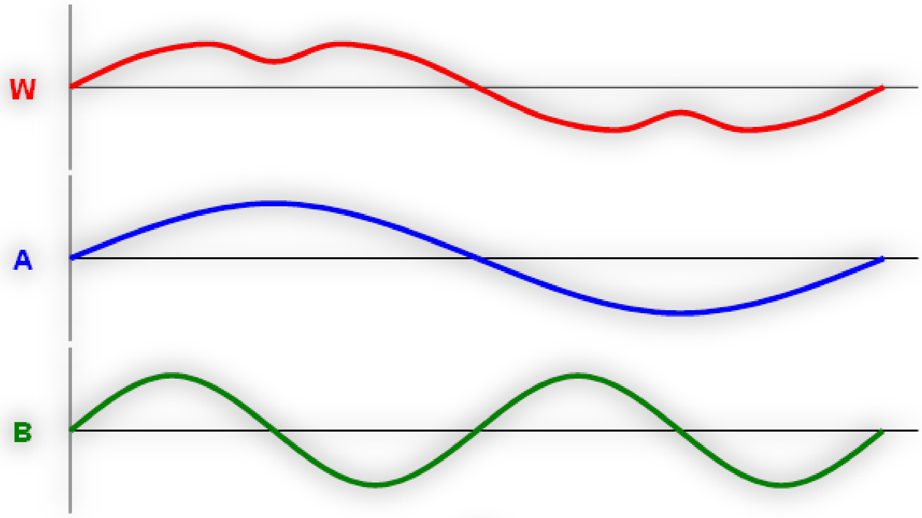


ونلاحظ عند نقطة التقاطع كما بالرسم البيانى حيث عندها لا يتأثر مستوى السعة بعملية التكامل أى فقط عند ١٦٦ هرتز أو ٩٩٦٠ سيكل/دقيقة

٤- التشوية التوافقي وقياسات السعة

وفقاً لفورييه إذا وجد موجة جيبية معقدة "complex waveform" غير منتظمة (أي عشوائية، والأحداث لا يمكن التنبؤ بها) يمكن تمثيلها كما لو كانت مجموع موجات فردية كثيرة (جيبية "sine" وجيب التمام "cosine") مختلفة فى التردد والسعة. وتسمى عملية تحليل الدالة الأصلية (أى تفكيك الموجة الجيبية المعقدة) إلى مركباتها من الدوال التوافقية المركبة (موجات جيبية بسيطة) بتحويل فورييه.

والموجات الناتجة من تحويل فورييه من الممكن أن تكون منسوبه إلى بعضها البعض. على سبيل المثال الموجة الجيبية "waveform" التى رمزنا لها بالرمز (W) كما بالشكل (a) تتكون من موجتان جيبيتان نقيتان "pure sine waves" هما (A وB). حيث أن تردد الموجة (B) ضعف الموجة (A) وفى هذه الحال يمكننا القول بأن الموجة (B) تتوافق "harmonic" مع الموجة (A). ويمكننا أن نقول أيضاً أن (A) نصف تردد (B) وفى هذه الحالة يمكننا القول أن (A) "sub-harmonic" من (B).



(a)

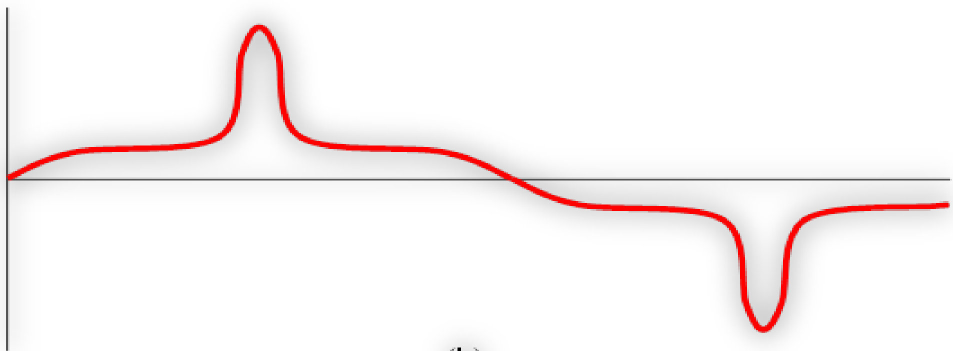
والموجة الجيبية النقية من الممكن أن تصبح موجة جيبية معقدة من خلال التشوية التوافقى "harmonic distortion" وخلط عدة موجات جيبية متنوعة منسوبه إليها "harmonics".

ويمكن لقياسات السعة "measuring amplitude" لكل من القمة (Peak) ومن القمة إلى القمة (Peak-to-Peak) والمتوسط (average) يكونوا عرضةً للخطأ نتيجة التشوة التوافقى " harmonic distortion".

على سبيل المثال تتميز الموجة الجيبية فى الشكل (b) بالرفع السريع "spike" (قمة) فى مدة قصيرة. ماذا تسمى قمة "peak" هذه الموجة، هل تسميها قمة المسمار "spike" أو تسميها قمة الهضاب المرتفعة الواسعة التى تحيط بقاع المسمار "spike" كلا هذان التعريفان للقمة "peak" له معنى ولكنه مختلف جداً.

هذا الإختلاف ينتج عنه إختلاف فى قيمة المتوسطات فى الشكل (b) لكل منهما نظراً لإختلاف قيمة القمة فى كل منهما، والتى تنتج عن طريق ضرب (peak × .637).

ولكن أى من القمة "peak" سوف نستخدمها؟ نظراً لإنفصال هاتين القمتين، سوف تختلف قيمة المتوسط بشكل كبير من الواحدة إلى الأخرى.



(b)

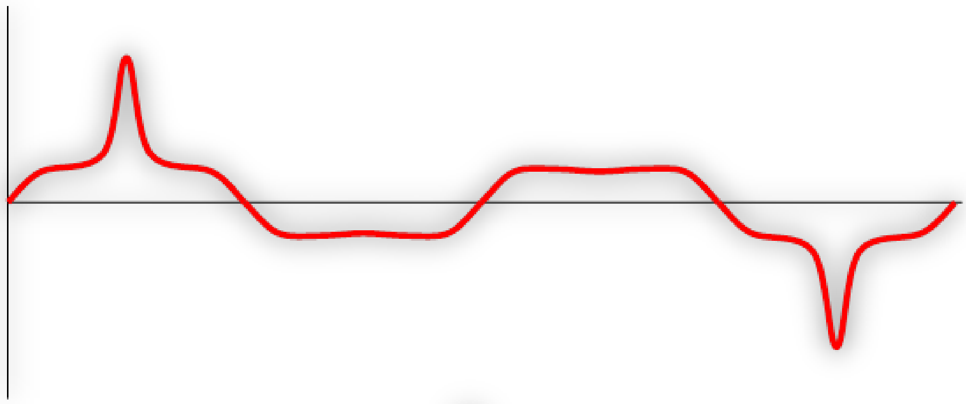
نعتبر أن أرجوحة معلقة بحبال قوية. وإذا رغبت فى التأرجح بسرعة (تردد عالى) إجعل الحبل صغير للغاية (نفترض أنه بطول ٣ قدم).

وإذا رغبت أن تتأرجح ببطء شديد (تردد منخفض) وكان المكان متسعاً فإجعل الحبل بطول ٥٠٠٠ قدم مثلاً.

وفى كلتا الحالتين فإن طول الحبل فقط هو الذى يحدد التردد أما وزن الشخص الجالس على الأرجوحة ليست مهمة.

٤-١- تأثير التشوية التوافقى على قياس السعة

فى الصناعة عندما تقاس السعة من القمة الى القمة "peak-to-peak" تشعر فى كثير من الأحيان أنها تعطى مؤشر عن مدى كيفية تحرك النظام. ونلاحظ فى الشكل (c) أن النظام يتحرك فى موجة جيبية فى الدورة الأولى "one cycle" حركة كبيرة جداً فى الإتجاه الموجب "spike" وحركة قليلة جداً فى الإتجاه السالب. وفى الدورة التالية "next cycle" يكون العكس فيتحرك النظام حركة لابأس بها فى الإتجاه السالب "spike" وحركة قليلة جداً فى الإتجاه الموجب.



(c)

كيف يمكنك تحديد السعة من القمة الى القمة "peak-to-peak" على هذه الموجة الجيبية؟ إذا نظرت إلى سيكل واحدة تجد أن السعة من القمة الى القمة أصغر بكثير مقارنةً بإجمالى المسافة بين أقصى حركة فى الإتجاه الموجب وأقصى حركة فى الإتجاه السالب (وهى مدة العينة مثلاً).

ولكن بحكم تعريف السعة من القمة الى القمة هى الحركة الكلية خلال سيكل واحدة. ولكن بعض الناس أحياناً تختار القمة "true peak" وهى المسافة بين أقصى قمة "peak" فى الإتجاه الموجب وأقصى قاع فى الإتجاه السالب خلال نفس العينة "sample" بغض النظر عن السيكل "cycle".

التشوية التوافقى "harmonic distortion" له تأثير كبير جداً على قياسات السعة. كيف يمكن أن تحدد القمة؟ هل تقيس السعة من القمة الى القمة خلال سيكل واحدة أو ضمن عينةً بأكملها؟ ما مدى

دقة المتوسط "Avg" الخاص بك؟ مربع الجذر التربيعي "RMS" يساوى٠.707 مضروباً فى القمة "peak". وهذا صحيح فقط للموجات الجيبية النقية "waveform" ولكن بالنسبة للموجات الجيبية المعقدة "complex" ستكون "RMS" أقل أو أعلى من ٠.707 مضروباً فى القمة "peak".

المتوسط "Avg" للموجة الجيبية المعقدة "complex" يعتمد على علاقة زاوية الوجه "phase" بين مختلف التوافقات "harmonics".

وعلاقة زاوية الوجه تلغى كل منهما الآخر فى حالة كونهما عكس بعضهما "out in phase" وتكبر عندما يكونا فى نفس الإتجاه "in phase". هذا التداخل يؤثر على متوسط القيمة "Avg" للموجة الجيبية الناتجة.

ولكن قيمة مربع الجذر التربيعي "RMS" لا تتأثربعلاقة زاوية الوجه "phase" بين مختلف التوافقات "harmonics" لأن "RMS" معنية فقط بالمساحة تحت المنحنى كنتيجة للتوافقات "harmonics".

وعملية حساب "RMS" مازالت الطريقة الأكثر دقة لتحديد كمية طاقة الإهتزاز بغض النظر عن ما إذا كانت موجة الإهتزازات موجة جيبية نقية أو موجة جيبية معقدة.

٥- معامل كريست "Crest factor" وشكل الموجة

معامل كريست "Crest factor" للموجة الجيبية هو عبارة عن مقدارالقمة "peak" للموجة الجيبية مقسوماً على مربع الجزر التربيعي "RMS" لتلك الموجة.

$$\text{معامل كريست "Crest factor"} = \frac{\text{القمة "peak"}}{\text{مربع الجزر التربيعي "RMS"}}$$

فى الموجة الجيبية النقية:-

مربع الجزر التربيعي"RMS" = مقدارالقمة "peak" X ٠.٧٠٧

وبالتعويض فى معادلة معامل كريست يمكننا حساب قيمته كالتالى:-

$$\text{معامل كريست Crest factor} = \frac{\text{القمة "peak"}}{\text{مربع الجزر التربيعي "RMS"}} = \frac{1}{0.707} = 1.414 = \sqrt{2}$$

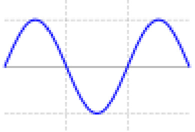
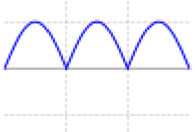
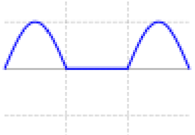
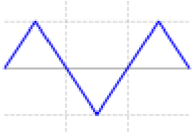
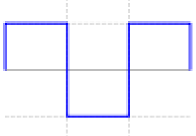
معامل كريست يكون مفيداً جداً فى حالة عدم ظهور شكل الموجة الجيبية للإهتزازات " time waveform" على النظام الذى تستخدمه. بعض أجهزة القياس "Vibration analyzer" لا تعطيك شكل الموجة الجيبية وبدلاً من ذلك تعطيك فقط قراءة لمعامل كريست.

إذا كان جهاز الإهتزازات الخاص بك يعطى قراءة لمعامل كريست، إنك تعلم أنه إذا كانت قراءة معامل كريست تساوى (١.٤١٤) فإن ذلك يعنى أن شكل موجة الإهتزازات عبارة عن موجة جيبية نقية "Pure sinewave".

واذا كانت قيمة قراءة معامل كريست أكبر من (١.٤١٤) فمعنى ذلك أن الموجة الجيبية "Waveform" لها قمم (ذو إرتفاع سريع "fast rise" بفترة قصيرة "short duration")، وبينما القمة مرتفعة جداً "peak" تجد أن قيمة "RMS" منخفضة نظراً لصغر المساحة تحت المنحنى "Small area under the curve".

وإذا كانت القراءة أقل من 1.414 معنى ذلك أن الموجة الجيبية تقترب "approaches" من شكل الموجة المربعة "square wave"، وبينما القمة منخفضة ولكن "RMS" عالية نوعاً ما نظراً لكبر المساحة تحت المنحنى "large area under the curve".

والجدول التالى يوضح معامل كريست لأنواع مختلفة للموجة الجيبية

Wave type	Waveform	Peak magnitude	RMS value	Crest factor
DC		1	1	1
Sine wave		1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$	$\sqrt{2} = 1.414$
Full-wave rectified sine		1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$	$\sqrt{2} = 1.414$
Half-wave rectified sine		1	$\frac{1}{2} = 0.5$	2
Triangle wave		1	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0.577$	$\sqrt{3} \approx 1.732$
Square wave		1	1	1

القسم الثانى:- الضمانات اللازمة لصحة قياس الإهتزازات

مقدمه:-

من المعروف أن بصمة الإهتزازات للمعدة "spectrum" أهم أداه لتحليل وتشخيص الإهتزازات وعند قياس الإهتزازات عادةً ما نقيس بصمة الإهتزاز "vibration spectra" لأنها تعطينا تفاصيل دقيقة وكبيرة عن حالة المعدة "condition" وأجزائها المختلفة بالإضافة إلى معرفة سبب الإهتزازات "cause of vibration".

ومن الطبيعى طالما أن بصمة إهتزازات المعدة تعطينا معلومات قيمة "valuable information" فيجب أن نضمن قياسها بكل دقة و مراعات شروط وضمانات معينة لضمان قياسها بكل دقة وهذه الشروط هى:-

- التعرف "recognize" على الماكينات التى يجب مراقبتها.
- فهم كيفية تثبيت "mounted" لواقط الإهتزازات "vibration sensors".
- تحديد كيفية وضع بارامترات "parameters" قياس الإهتزازات.
- أخذ القياسات بطريقة منظمة "systematic way".

١- التعرف "recognize" على الماكينات التى يجب مراقبتها

برنامج الصيانة الحديثة يأخذ فى إعتباره أهمية المعدات بالنسبة للإنتاج وتاريخ الأعطال بها ووضع خطة للقياسات الشهرية والأسبوعية بحيث تتلائم وتتوافق مع تلك الأهمية ويتم تقسيم الماكينات من حيث الأهمية إلى ماكينات حرجة وهامة "critical" وهى الماكينات التى تؤثر على العملية الإنتاجية بشكل مباشر. وماكينات متوسطة الأهمية "sub- critical" وهى المعدات التى إذا حدث بها عطل يكون له صدى ولكن ليس له مردود على عملية الإنتاج أو على الأفراد. وماكينات أقل أهمية "non-critical" وهى المعدات التى لها إحتياطى ولا تمثل خطورة عند توقفها.

ولذلك عند إختيارالماكينات التى يجب مراقبتها، ينبغى أن نعطى أولوية للماكينات الحرجة عن الماكينات الأخرى.

وهذا مشابه إلى حد كبير لمراقبة صحة الناس فمن غير المناسب مراقبة صحة الأشخاص الأصحاء تماماً ثم التخلى عن مراقبة الآخرين الذين بحاجة إليها.

وينطبق الشئ نفسه عند مراقبة حالة الماكينات وبشكل عام يجب مراقبة الأنواع الآتية من الماكينات الحرجة التى يجب مراقبتها على فترات منتظمة "regular basis" من أجل تجنب مشاكل غير متوقعة "unexpected" ومكلفة "costly":-

- الماكينات التي تتطلب إصلاحات مكلفة وطويلة أو من الصعب إصلاحها عند الكسر.
- الماكينات التي تعتبر بالغة الأهمية لعمليات الإنتاج أو المصنع "critical".

- الماكينات التي هي معروفة بكثرة الأعطال.
- الماكينات التى تأخذ وقت طويل فى تجهيز قطع الغيار.
- الماكينات التي تؤثر على سلامة الإنسان أو البيئة "environmental safety".

٢- إختيار نوع اللاقط وكيفية عمله "Transducer type"

قبل قياس الإهتزازات للمعدة نحتاج إلى ربط مجس الإهتزاز "attach a sensor" الذى يمكنه الكشف عن سلوك الإهتزازات "vibration behavior" بالماكينة المراد قياسها.

جميع أنواع مجسات الإهتزازات المختلفة "vibration sensors" متوفرة ولكن هناك نوع من المجسات يسمى لاقط الإهتزازات "accelerometer" عادةً ما يتم إستخدامه فى قياس الإهتزازات "measuring vibration" لتميزه عن سائر أنواع أجهزة الإستشعار "sensors" الأخرى.

ولديك حرية إختيار أنواع أخرى من اللواقط أو المجسات "probe" لقياس الإهتزازات مثل مجس الإزاحة "displacement" (non-contact eddy current) أو لاقط قياس السرعة " velocity transducer" (velocity meter) .

وكل مجس من هذه المجسات له خصائص مختلفه ولا سيما إستجابته للتردد " frequency response". وبطبيعة الحال، فإن إختلاف تلك الخصائص يكون مؤثراً في قياس الشكل الموجى "time waveform".

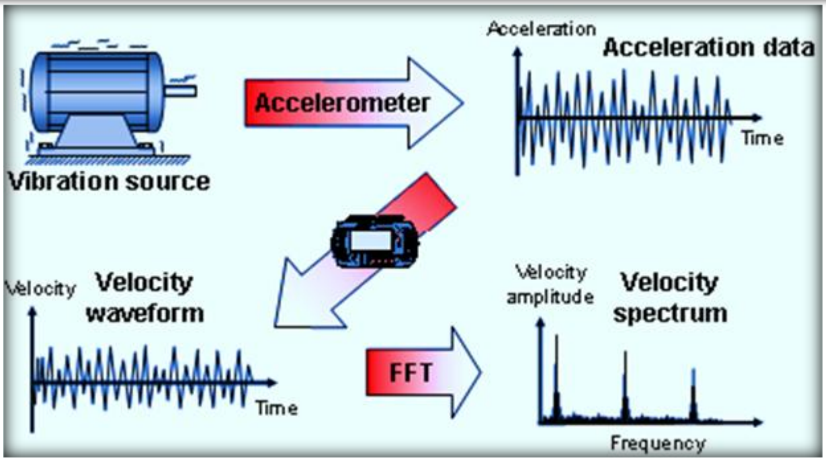
على سبيل المثال، إننا لا ننظر لصدمات الترددات العالية "high frequency impacting" أو نبضات التكهف "cavitation pulses" من البيانات المأخوذة من مجس الإزاحة " displacement probe".

ولاقط الإهتزاز هو مجس ينتج إشارة كهربائية "electrical signal" تتناسب مع العجلة "acceleration" للجسم المهتز المربوط به لاقط الإهتزاز "attach accelerometer".

وإشارة العجلة "acceleration data" الناتجة بواسطة لاقط الإهتزاز "accelerometer" تمرمن خلال جهاز جامع الإهتزازات "data collector" الذى بدوره يحول هذه الإشارة إلى إشارة سرعة "velocity signal".

وإعتماداً على إختيار المستخدم يمكن عرضها أما "velocity waveform" أو " velocity spectrum" مع العلم بأن "velocity spectrum" مستمدة أو مستنتجة من "velocity waveform" عن طريق حسابات رياضية المعروفة بإسم تحويل فورييه السريع أو FFT (Fast Fourier Transform).

والرسم البيانى الآتى هو تفسير مبسط جداً عن كيفية الحصول "acquired" على بيبانات الإهتزازات "vibration data".



٣- وضع بارامترات قياس الإهتزازات "measurement setup"

ومن المؤسف أن كل من الفترة الزمنية "time span" والدقة "resolution" للشكل الموجى " time waveform" تتأثر بكل من مدى التردد "frequency span" ودقة البصمة "resolution".

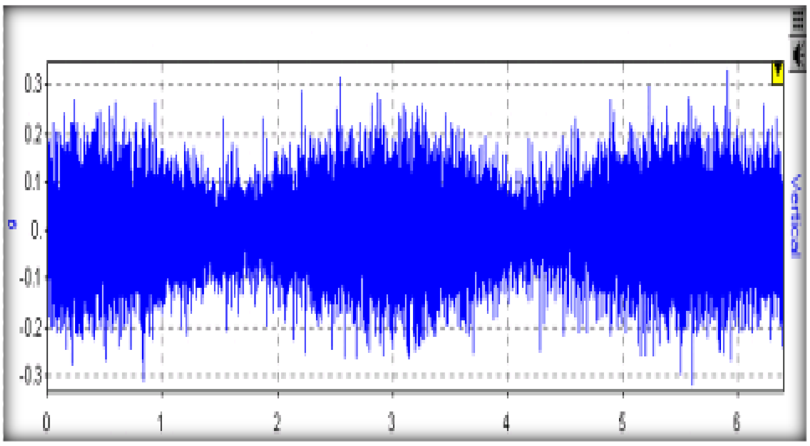
ومعظم الناس تضع باراميترات جمع البيانات على أساس مدى التردد المطلوب (بناءً على سرعة الماكينة) وليس على الشكل الموجى.

مع العلم بأن كل من نطاق التردد والفترة الزمنية "time span" للشكل الموجى تتناسب عكسياً.

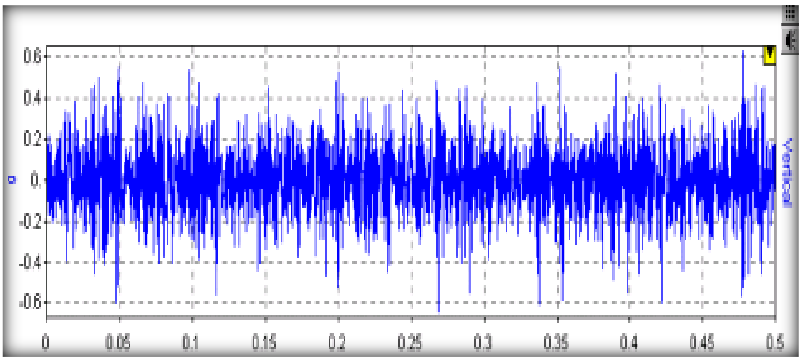
The time span = Number of samples / (Frequency span * 2.56)
Frequency span = Number of samples (Time span * 2.56)

على سبيل المثال، بصمة دقتها ٨٠٠ خط "resolution" (٢٠٤٨ عينة "samples" في الشكل الموجى)، إذا كان نطاق التردد عالى (٣٠٠٠ هرتز)، فإن الفترة الزمنية ستكون صغيرة (٠.٢٦٧ ثانية). وإذا كان نطاق التردد صغير (٣٠٠ هرتز) فإن الفترة الزمنية ستكون أطول (٢.٦٧ ثانية).

دعونا ننظر إلى مثالين – عينات "samples" أخذت من نفس الماكينة بمعدلات مختلفة. في الحالة الأولى ٦ ثوانى كاملة للفترة الزمنية لبيانات الشكل الموجى وبصمة دقتها "resolution" ٣٢٠٠ خط. يمكننا أن نرى التردد المنخفض لكل من "beating" و"modulation" فى الشكل الموجى.



وإذا وضعنا نطاق التردد ١.٦ كيلو هرتز والدقة "resolution" ٨٠٠ خط، فيبدو أن البيانات مختلفة تماماً.



بالنظر إلى الشكل الموجى لا تظهر كل من "beating" و"modulation"، ولكننا ممكن أن نرى "transients" عشوائى قد يشير إلى التفكك.

والدقة والفترة الزمنية لهما أهمية كبيرة فى تحليل الشكل الموجى. فإذا أردنا تحليل أحداث الترددات العالية مثل "transients" فإننا بحاجة إلى فترة زمنية قصيرة جداً. وإذا أردنا رؤية "modulation" فإننا بحاجة إلى فترة زمنية أوسع. وإذا أردنا رؤية تغييرات طويلة "long term" فى مستويات الإهتزازات "vibration levels" فنحن بحاجة إلى فترة زمنية أوسع.

وهناك محاولة لتحديد الفترة الزمنية قام بها بول ألين كاتلين عام ١٩٨٧ "Paul Allen Catlin" فإذا إعتبرنا فترة معدل الدوران للماكينة (T)، فإننا بحاجة إلى فترة زمنية (T /١٠٠) من أجل عرض تفاصيل الأحداث عالية التردد مثل (transients).

مثال، ماكينة تدور بسرعة ١٨٠٠ RPM (١٥٠٠ RPM) فإننا بحاجة إلى فترة زمنية ٠.٠٠٠٣٣٣ ثانية (٠.٠٠٠٠٤ ثانية).

ملحوظة:-

سرعة الدوران = ١٨٠٠ سيكل/دقيقة = ١٨٠٠/٦٠ = ٣٠ سيكل/ثانية

الزمن (T) = ١/التردد (F) = ١/٣٠ = ٠.٠٣٣٣ ثانية

الفترة الزمنية "time span" = T /١٠٠ = ٠.٠٣٣٣ /١٠٠ = ٠.٠٠٠٣٣٣ ثانية

وإذا أردنا رؤية أحداث "events" لمضاعفات الترددات العالية فى الشكل الموجى فإننا بحاجة إلى فترة زمنية قصيرة (T/١٠).

مثال، ماكينة تدور بسرعة ١٨٠٠ RPM (١٥٠٠ RPM) فإننا بحاجة إلى فترة زمنية "time span" ٠.٠٠٣٣٣ ثانية (٠.٠٠٠٤ ثانية).

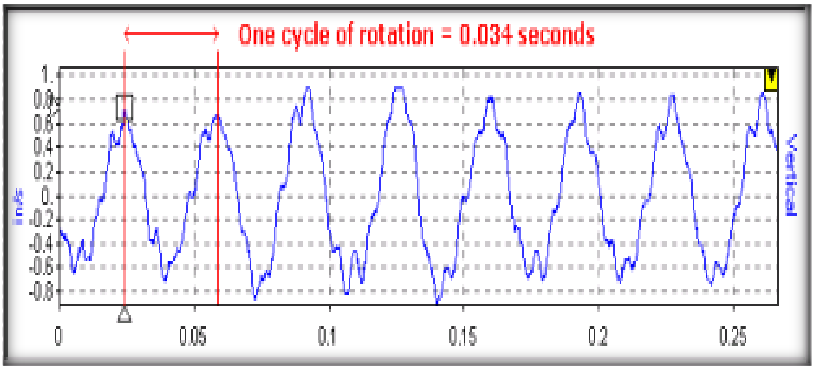
وإذا أردنا إلتقاط "capture" لفة واحدة من سرعة دوران العمود "one cycle of rotation"، وهو مناسب لتنفيذ الإتزان "balancing" وتحليل زاوية الطور "phase analysis"، فإننا بحاجة إلى فترة زمنية (T).

مثال، ماكينة تدور بسرعة ١٨٠٠ RPM (١٥٠٠ RPM) فإننا بحاجة إلى فترة زمنية "time span" ٠.٠٣٣ ثانية (٠.٠٤ ثانية).

وإذا أردنا إلتقاط "capture" مضاعفات سرعة دوران العمود "multiple cycles of rotation"، فإننا بحاجة إلى فترة زمنية (١٠T).

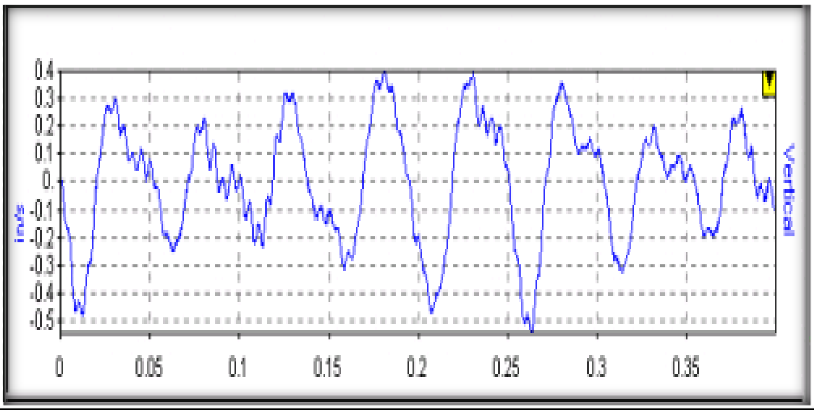
مثال، ماكينة تدور بسرعة ١٨٠٠ RPM (١٥٠٠ RPM) فإننا بحاجة إلى فترة زمنية "time span" ٠.٣٣٣ ثانية (٠.٤ ثانية).

مثال آخر لتوضيح هذه النقطة، ماكينة تدور بسرعة ١٧٧٦ CPM (29.6 Hz) فإن الفترة الزمنية (T) "time span" ١/٢٩.٦ أو (٠.٠٣٤ ثانية).

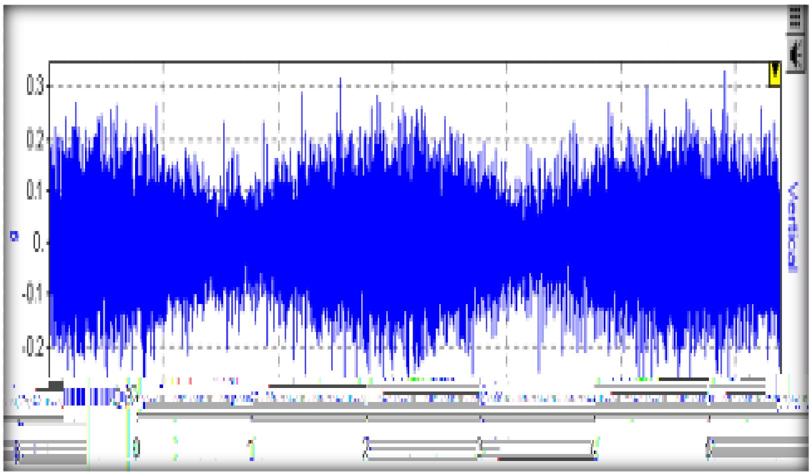


وإذا أردنا إلتقاط "capture" عدد كبير من سرعة دوران العمود "larger number of cycles" لنتمكن من رؤية التغيرات بمرور، خصوصاً لمعرفة صلة أو علاقة زاوية الطور خلال الشكل الموجى. فإننا بحاجة تقريباً إلى فترة زمنية (١٠T).

على الرغم من أن هذه العينة ليست (١٠T) بالكامل، فإنها توضح بعض الأنماط "patterns" عندما يكون لديك عدد كبير من سرعة الدوران.

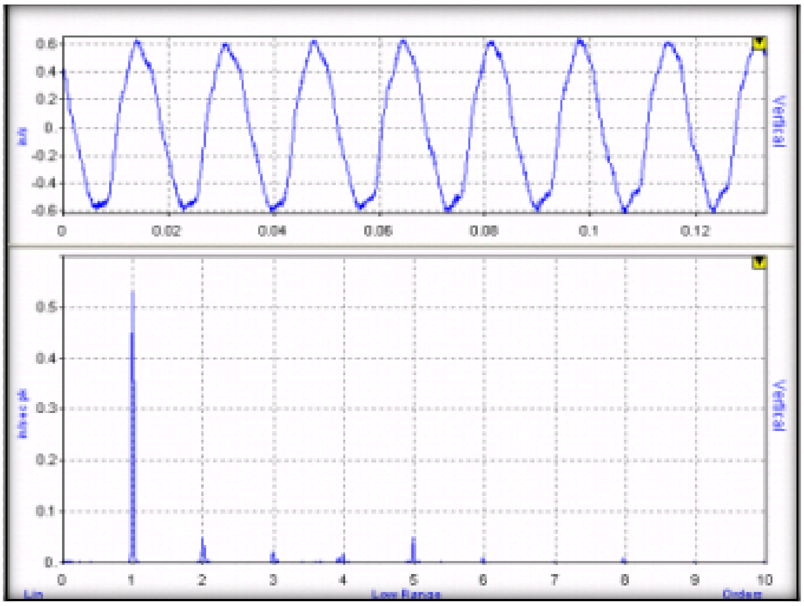


وأخيراً، لعرض مدى طويل من منحنى الطور والترددات المنخفضة للكشف عن كل من "beating" أو"modulation"، فيجب وضع الفترة الزمنية حوالي (T١٠٠). على الرغم من أن هذه العينة ليست (T١٠٠) بالكامل، فإنها تساعدك من الإستفادة من وجود زمن أطول.



٣-١- جمع بيانات الشكل الموجي وسعة التخزين

السؤال الذى يمكن أن تسأله لنفسك ما إذا كنت ستقوم بجمع بيانات الشكل الموجى " time waveform" مع كل قياس وفى جميع الإتجاهات أو فقط على إحدى محاور القياس "single axis"؟ ومن المعروف أن الوقت المستخدم فى قياس بيانات الشكل الموجى "collecting time" صغير جداً وبالتالى يجب الحفاظ على قياسها مع كل قياس من أجل حساب بصمة الإهتزازات (FFT).



حتى لو كنت تقوم بعمل قياسات خاصة "special test" لإلتقاط الشكل الموجي " acquire a waveform" بشكل روتيني فإنه مع طول أو قصر الفترة الزمنية فإن الوقت المطلوب فى كل الحالات هو الحد الأدنى.

ويجب أن تعلم بأن بيانات الشكل الموجى تتطلب ذاكرة أكبر من بيانات البصمة وهذا لا يسبب مشكلة لأن أغلب أجهزة جمع البيانات "data collectors" والكمبيوتر تحتوى على سعة تخزينية كافية، والوقت اللازم لنقل البيانات "transfer time" من أجهزة جمع البيانات إلى الحاسب الآلى ليس كبيراً.

٤- تثبيت لاقط الإهتزازات على المعدات "accelerometer mounted"

تشترك معظم الآلات الدوارة بكونها لها ميكانزمات للحركة الدورانية "rotary mechanisms" مثل المواتير والطلمبات والكومبروسور والمراوح والسيور الناقلة "conveyors" وصناديق التروس.

وأغلب الميكانزمات الدوارة لها كراسى تحميل "bearings" التي تحمل "support" أوزان الأجزاء الدوارة "rotating parts" وتتحمل القوى والإهتزازات المصاحبة للحركة الدورانية، وبشكل عام هى تتحمل كميات كبيرة من القوة. وليس من المستغرب أن كراسى التحميل غالباً ما تكون المكان الذي تحدث له كل المشاكل وتظهر فيه أعراض "symptoms" العطل من حرارة وضوضاء وإهتزازات. وبالتالي قياسات الاهتزاز تؤخذ عادةً على رولمان البللى للماكينات مع تثبيت لاقط الإهتزازات "accelerometers mounted" بقدر الإمكان على رولمان البللى أو قريبةً منه.



هى مسائل تتعلق بحالة الماكينة "machine condition" وسلامة الإنسان وهى تعتمد أساساً على دقة القياسات "accuracy of measurements " فيجب أن نكون حذرين جداً للغاية " be very careful" من كيفية أخذ القياسات.

من المهم أن نتذكر دائماً أن الطريقة التي نثبت بها اللاقط "mount the accelerometer" هى التى تحدد كثيراً دقة القياسات "accuracy of measurements".

كيف يمكن تثبيت اللاقط "mounted" جيداً لضمان دقة القياسات وكيف يمكننا أن نفعل ذلك بشكل آمن "safely"؟

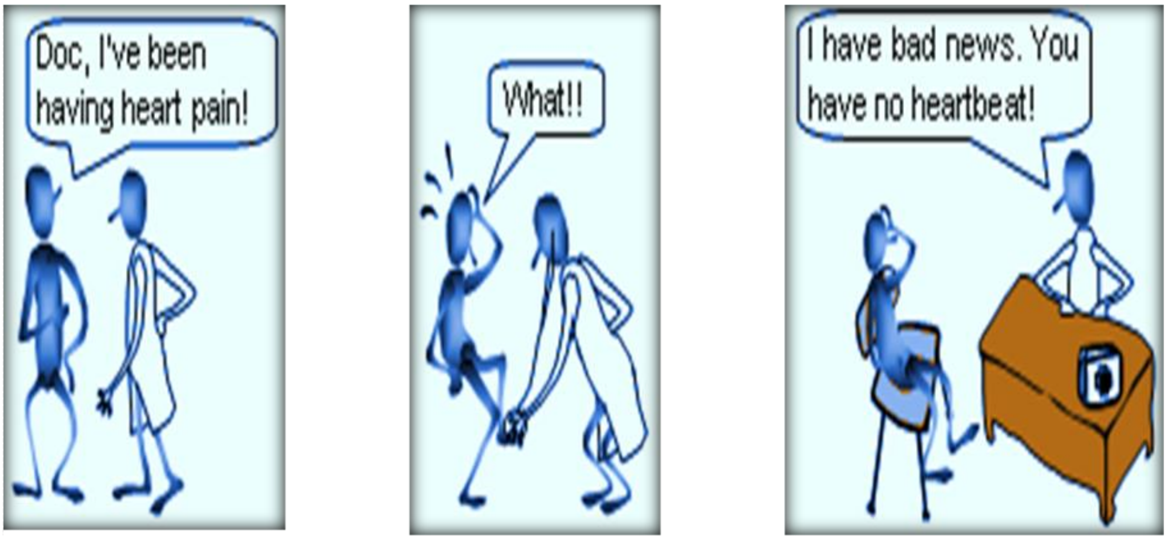
وهنا بعض الإرشادات "guidelines":-

- يجب أن يوضع لاقط قياس الإهتزازات بشكل آمن ولا يكون متمايلاً (مرتعشاً) "not wobble"
- يجب تنظيف الأسطح والدهانات والتى بها صدأ "rusted" أو تجنبها.

- يجب أن تكون نقاط القياس مسطحة "flat" ونظيفة وخالية من الشحوم "free of grease".
- يجب أن تحدد نقاط القياس بالضبط وبشكل واضح "clearly marked".
- يجب أن لا يتحرك كل من اللاقط "Sensor " والكابل أثناء القياس "during measurement".

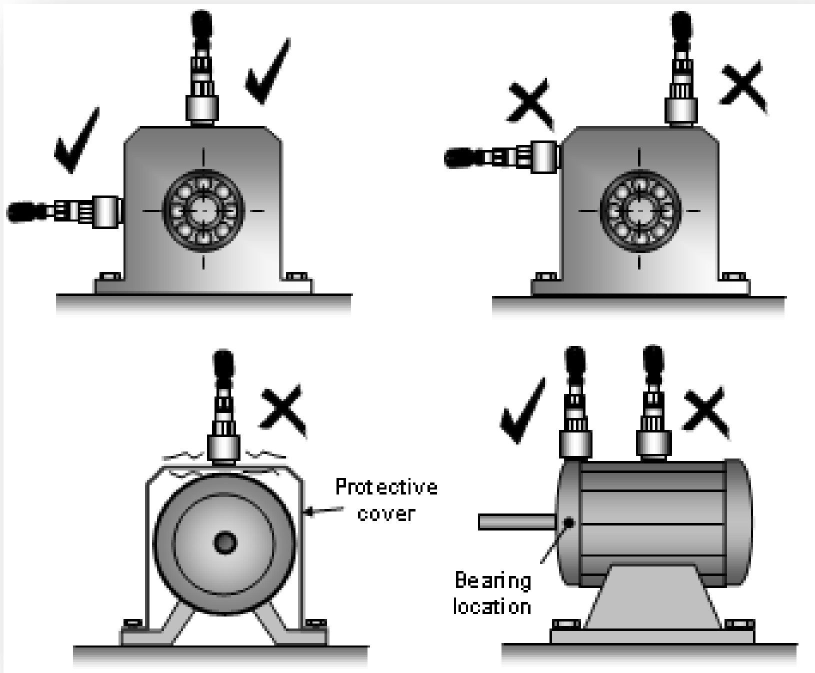
٤-١- تثبيت اللاقط بحيث يكون أقرب ما يمكن من رولمان البللى "Mount as Close as Possible to the Bearing"

تخيل الطبيب الذي استمع إلى قلبك من خلال ملابس سميكة ووضع سماعة الطبيب "stethoscope" الخاص بك أقرب إلى الكلى من قلبك. فمن المرجح أنك تشك "doubt" فى تشخيصه "diagnosis" لأنه يعتمد على أصوات وضوضاء ناتجة من الأعضاء "organs" الأخرى.



عند قياس الإهتزاز يجب أن يوضع "attach" لاقط قياس الإهتزازات أقرب ما يكون إلى رولمان البللى "مراكز التحميل" وبصورة أدق أقرب مايكون إلى خط السنتر لتجنب إلتقاط "picking up" الإشارات المشوهة "distorted signals".

حيث أنه من الخطأ أن نضع اللاقط على أى سطح غير متصل بقوة بالمعدة مثل غطاء الحماية "protective cover" أو حتى جسم المعدة نفسه طالما هناك إمكانية وضعه قريب وملاصق لمراكز التحميل.



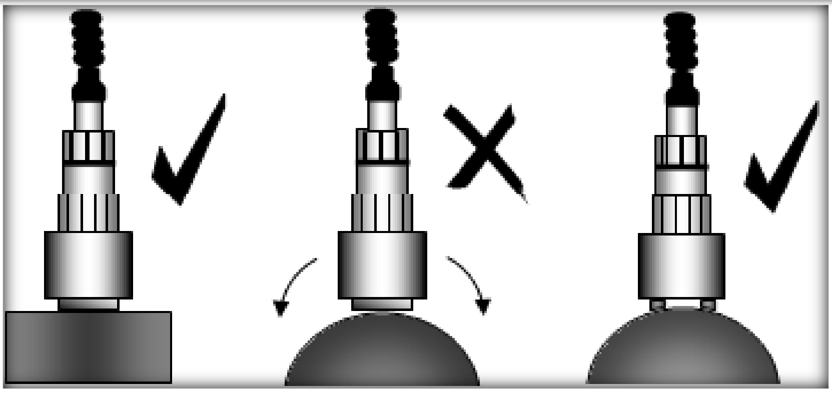
٤-٢- تأكد بأن اللاقط مثبت أو مربوط بحزم

"Make Sure the Accelerometer is Firmly Attached"

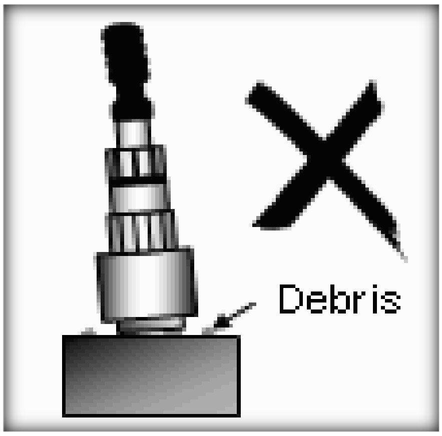
يجب أن يكون لاقط الإهتزاز مربوط بقوة "Firmly Attached" على سطح الماكينة لكى لايهتز "rock" أو يتحرك "move" بشكل مستقل عن أجزاء الماكينة ويبدو كأنه جزء أصيل من أجزاء الماكينة ويهتز تماماً بنفس الحركة الإهتزازية لأجزاء الماكينة لإكتشاف "detect" السلوك الحقيقى لإهتزاز الماكينة "true vibration behavior" (عند سحب اللاقط عمودياً من سطح التثبيت من المفروض أن يعطى قوة مقاومة مقدارها 22 kgf).

التثبيط المفكك "loosely mounted" أو الغير جيد للاقط الإهتزازات يعطى إشارات "signals" غير حقيقية أو مشوهة "distorted" نتيجة لحركاته الخاصة وبالتالى يعطى رسالة خاطئة " wrong message" أو غير حقيقية.

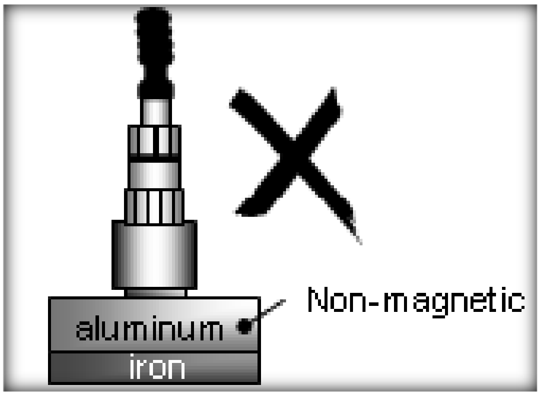
يوجد طرق تثبيت مختلفه ولكن التثبيت بواسطة مغناطيس "magnet" الأكثر شيوعاً لأنة يعطى بشكل متوازن الثقة فى القياسات وراحة المستخدم ويسمح للمستخدم بقياس ماكينات متعددة بإستخدام نفس اللاقط وبأقل زمن يستغرقه فى ربط "attaching" أو فصل "detaching" اللاقط. ولضمان ربط اللاقط بحزم يجب أن يلصق "stuck" بسطح قابل للإنجذاب المغناطيسى ويجب تثبيت المغناطيس بشكل آمن "securely" على السطح وفى الإتجاه الصحيح.



يجب التأكد من إلتصاق وثبات اللاقط بجسم المعدة خاصةً إذا كان سطح المعدة دورانى حيث يجب وضع أرجل مغناطيس اللاقط بوضعيه تضمن له الثبات وعدم الحركة (وذلك بجعل أعلى نقطة من سطح المعدة الدورانى داخل التجويف الذى بين أرجل اللاقط) كما هو موضح بالرسم فإذا كان سطح المعدة مستوى فيتم وضع أرجل اللاقط فى أى إتجاه.

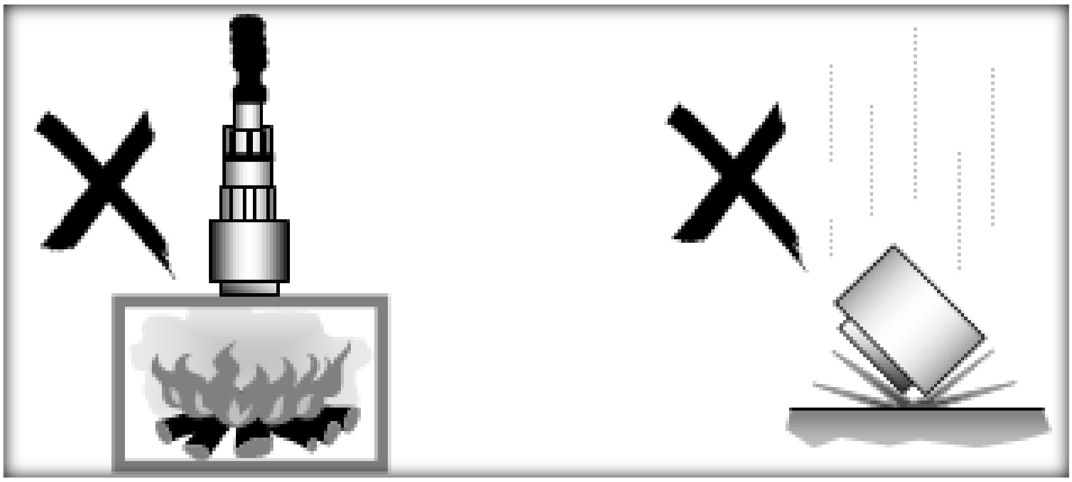


ولكى يكون السطح مستوى و نضمن ثبات اللاقط بجسم المعدة يجب التأكد من عدم وجود أى شوائب "debris" أو أتربة أو صدأ "rust" أو قشرة من الطلاء على السطح "paint flaking".



ويجب أن يكون سطح التثبيت "mounting surface" من مادة مغناطيسية "magnetic" أى قابلة للإنجذاب المغناطيسى كالحديد والنيكل وسبائك الكوبلت (iron, nickel, or cobalt alloys) لكى

يكون التثبيت جيداً ومن الخطأ أن يكون السطح من ماده غير مغناطيسية مثل الألمونيوم حتى وإن كان السطح السفلى من مادة قابلة للإنجذاب المغناطيسى لأنه سيؤدى إلى ضعف التثبيت.



ولتجنب فقد الخواص المغناطيسية لمغناطيس تثبيت اللاقط "magnetic mounting" يجب تفادى تعرض اللاقط للصدمات نتيجة لسقوطه على الأرض ولا يتعرض إلى الحرارة.

ويجب العناية عند فك وتركيب اللاقط مع المغناطيس حتى لا يتشوه سن القلاووظ.

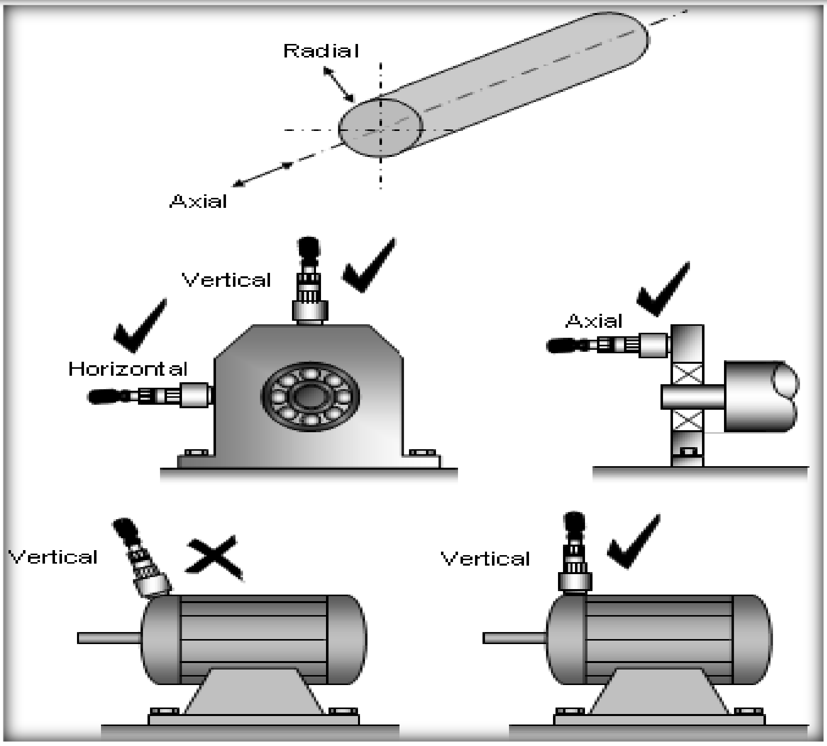
٤-٣- التأكد من وضع اللاقط فى الإتجاه الصحيح

"Make Sure the Accelerometer is Oriented Correctly"

تتطلب إختلاف حالات ومشاكل الماكينات أن يوجه اللاقط بشكل مختلف تبعاً لكل حالة على سبيل المثال لإكتشاف عدم ضبط المحاور أو عدم السنترة الإزاحى أو المتوازى " parallel misalignment" يجب تثبيت اللاقط عادة فى الإتجاه المتعامد على محور الدوران أى الإتجاه الإفقى والرأسى "radial direction" لرولمان البللى.

ولكى نكتشف عدم السنترة الزاوى "angular misalignment" يجب وضع اللاقط فى الإتجاه المحورى (إتجاه محور الدوران) لكرسى التحميل "axial direction".

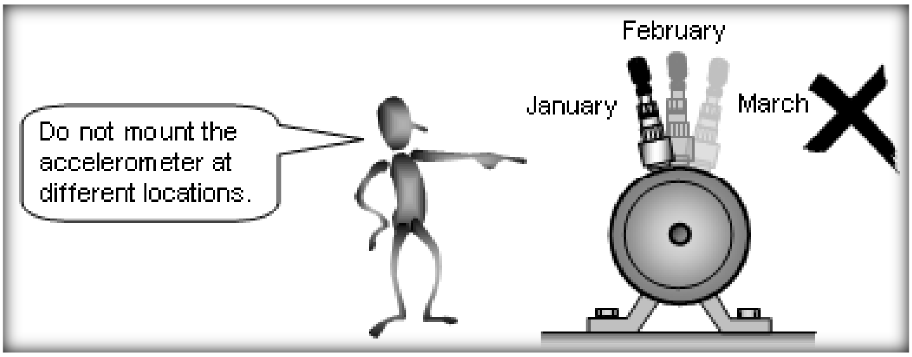
الإشارة الناتجة من اللاقط تعتمد على الإتجاه المثبت عنده اللاقط وسعة وقيمة الإهتزازات "amplitude" تتغير بإختلاف الإتجاه.



٤–٤ ثبت نفس اللاقط المستخدم فى نفس المكان

"Location Mount the Same Accelerometer in the Same"

عند أى نقطة قياس للإهتزازات "measurement point" من المهم دائماً "من الأهمية القصوى" أن نثبت اللاقط عند نفس المكان ولو أمكن إستخدام نفس اللاقط وذلك لتقليل تفاوتات القياس "minimize measurement inconsistencies" التى قد تؤدى إلى إستنتاجات خاطئة " wrong conclusions".



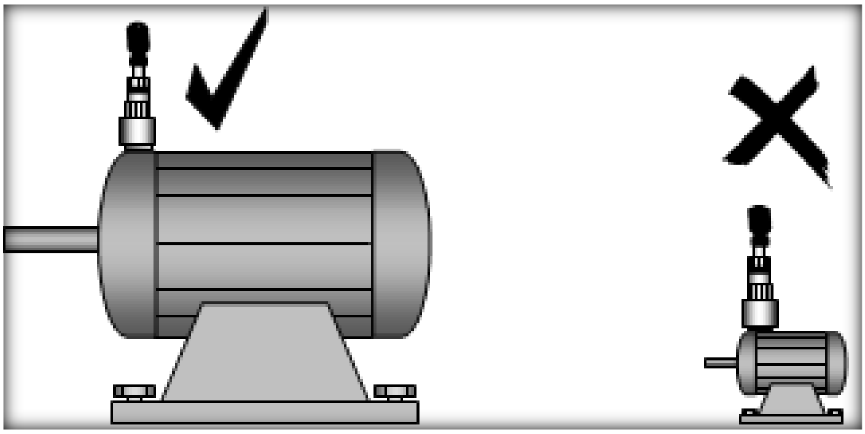
٤–٥ ثبت اللاقط على شئ متين

"Mount the Accelerometer on Something Substantial"

اللاقط لا يمكن أن يثبت بأى حال من الأحوال على الأجزاء المرنة جداً "very flexible part" للماكينة لأن بصمة الإهتزازات سوف تتأثر وتتشوه "distorted" برخاوة "flapping" الجزء المرن "flexible part".

وأيضاً لا يجب أبداً إستخدام اللاقط على الهياكل "structures" الخفيفة جداً حيث أن وزن اللاقط ومغناطيس التثبيت "magnetic mounting" سيحرفان "distort" سلوك إهتزاز " vibration behavior" هذا الهيكل "structure".

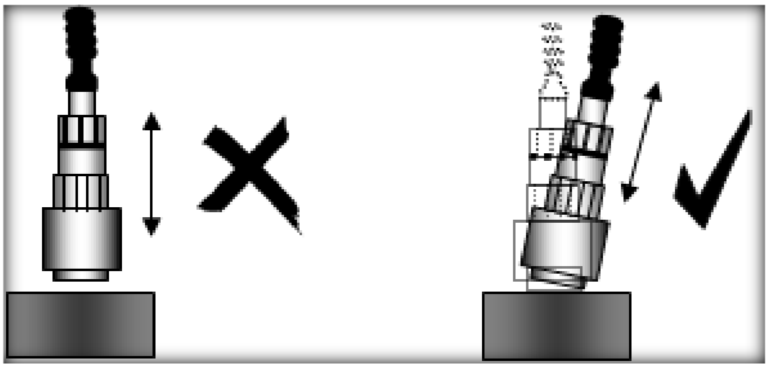
وعموماً الوزن المشترك "combined weight" للاقط الإهتزاز ومغناطيس التثبيت يجب أن يكونا أقل من ١٠ % من وزن الهيكل المهتز "vibrating structure" المقاس عليه.



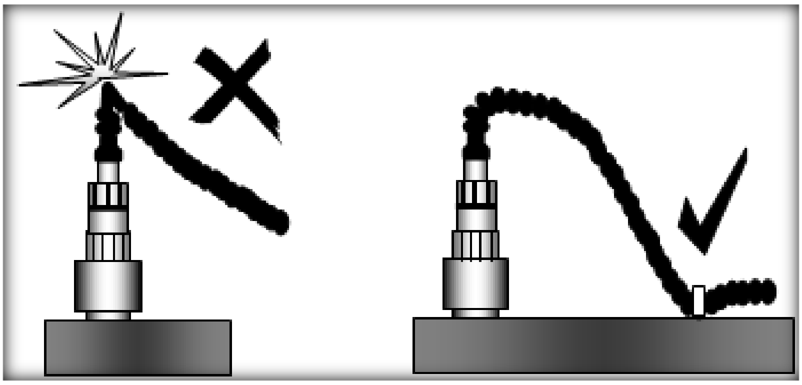
٤-٦- يجب الإعتناء بلاقط قياس الإهتزازات "Take Care of the Accelerometer"

إذا تم التعامل "treated" مع اللاقط بصورة سيئه "roughly" فمن الممكن أن تكون الإشارات الناتجه منه غير موثوق فيها "unreliable signals" ونتيجه لشدة الجذب المغناطيس لقاعدة اللاقط "magnetic mount" فيجب وضع اللاقط "attaching" على السطح المراد قياسه " mounting surface" بعنايه وحرص ويتحقق ذلك عن طريق تقريب اللاقط (لسطح نقطة القياس المحددة للماكينة المراد قياسها) بوضع مائل "tilted" حتى تلتصق حافته بزاويه مع السطح ثم يتم تعديل وضعه ببطئ حتى يلتصق بالكامل على السطح بدون أن يحدث إصطدام.

وعند فصل "detaching" اللاقط من السطح يجب عدم إستعمال جسم اللاقط كرافعه "lever" للتغلب على شدة الإلتصاق وبدلاً من ذلك يتم الإمساك بجسم الجزء المغناطيسى بإحكام ثم إمالته فى أى جانب للتغلب على شدة الإلتصاق ثم رفعه من على السطح بسهولة دون الضرر بجسم اللاقط نفسه.



يجب الحرص على عدم إلتواء "twisted" كابل اللاقط بحدة بل تثبيته "anchored" جيداً بطريقة تضمن ثباته وحمايته من التلف. فالإلتواء الشديد أو التأرجح الحر "freely swinging" لكابل اللاقط يؤدى إلى تشوه بصمة الإهتزاز.

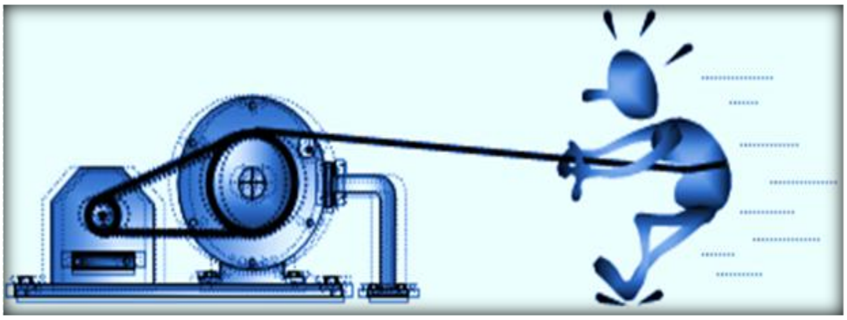


٤-٧- الإعتناء بالأمان الشخصي "Take Care of Personal Safety"

يجب إدارة المخاطر "manage hazards" فى جميع الأوقات ويوجد ثلاثة أنواع من المخاطر تختلف فى الإمكانية أو الشدة عند أخذ قياسات الإهتزازات على المعدات وهى الإصابة "injury" من الأجزاء المتحركة للماكينات"moving parts"، الصدمات الكهربية "electrical shock" وأخيراً الأضرار الناتجة من تأثير المثبت المغناطيسى للاقط الإهتزازات "magnetic mounting".

٤-٧-١- الإصابة "injury" من الأجزاء المتحركة للماكينات "moving parts"

عند تثبيت "mounting" اللاقط يجب توخى الحذر لمنع الكابل من الإشتباك "entangled" مع الأجزاء الدوارة. وسرعة نقل المغناطيس وتوصيلات اللاقط يقلل هذا الخطر وهذه السرعة لا تكون بديل عن التركيب الصحيح. الأشياء الأخرى التى يمكن أن تتشابك "tangle" مع الأجزاء المتحركة تتضمن الملابس الواسعة الطليقة "loose clothing" أو الشعر الطويل "long hair" أو كابلات التوصيل "data transfer cables" والأحزمة "straps".



٤-٧-٢- الصدمات الكهربية "electrical shock"

لا يجب أبداً ربط اللاقط "attach" بأسطح الفولت العالى "high voltage" لأنة قد يسبب صدمة كهربية "electrical shock".

٤-٧-٣- الأضرار الناتجة من تأثير المثبت المغناطيسى للاقط الإهتزازات "magnetic mounting"

لا يجب أبداً أن تقرب المثبت المغناطيسى من أى أجسام مغناطيسية حساسة مثل أجهزة ضبط نبضات القلب "pacemakers"، بطاقة الإئتمان "credit cards"، الأقراص المرنة وأشرطة الفيديو .. إلخ.

مثل هذه المواد يمكن أن تتلف "damaged" بالمجال المغناطيسى. وأخيراً يجب نتذكر دائماً أن هناك أخطار أخرى محتمله يجب أن تلم بها قبل إستعمال الجهاز وملحقاته.

القسم الثالث:– جمع بيانات الإهتزازات



١– إستخدام جهاز جامع الإهتزازات لقياس الإهتزازات على المعدات "data collected"

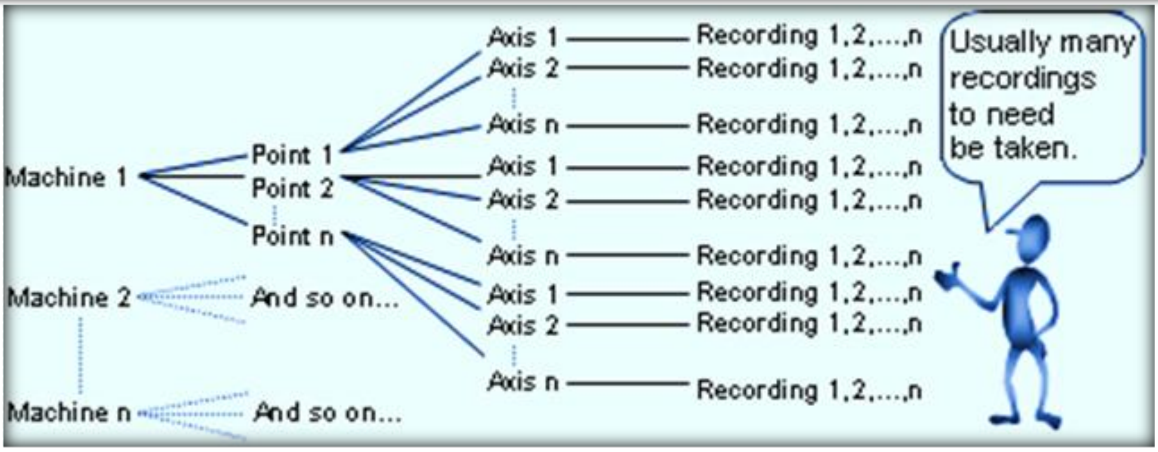
يستخدم لقياس الاهتزازات جهاز يسمى "Data collector" يتفاوت في الإمكانات والقدرة على تحديد المشكلات ويتفاوت "sensor" القياس أيضاً في دقة وسرعة القياس ويكون الجهاز في الغالب مصحوب ببرنامج "software" خاص به لتحليل البيانات المقاسه. علماً بأن طريقة تثبيت اللاقط أوالمجس "sensor" تختلف حسب التطبيق المراد قياسه.

من المعروف أن المنطقة المحيطة بالماكينة خطرة وغير مريحة ولذلك يتم تنفيذ تحليل الإهتزازات "vibration analysis" عادةً بعيداً عن الماكينة. وتجمع القياسات بإستخدام جهاز جامع الإهتزازات "data collector" ثم تنقل إلى المكتب حيث يتم تنزيل القياسات إلى جهاز الكمبيوتر لتحليلها بطريقة أكثر تفصيلاً فى بيئةٍ هادئةٍ وآمنة.

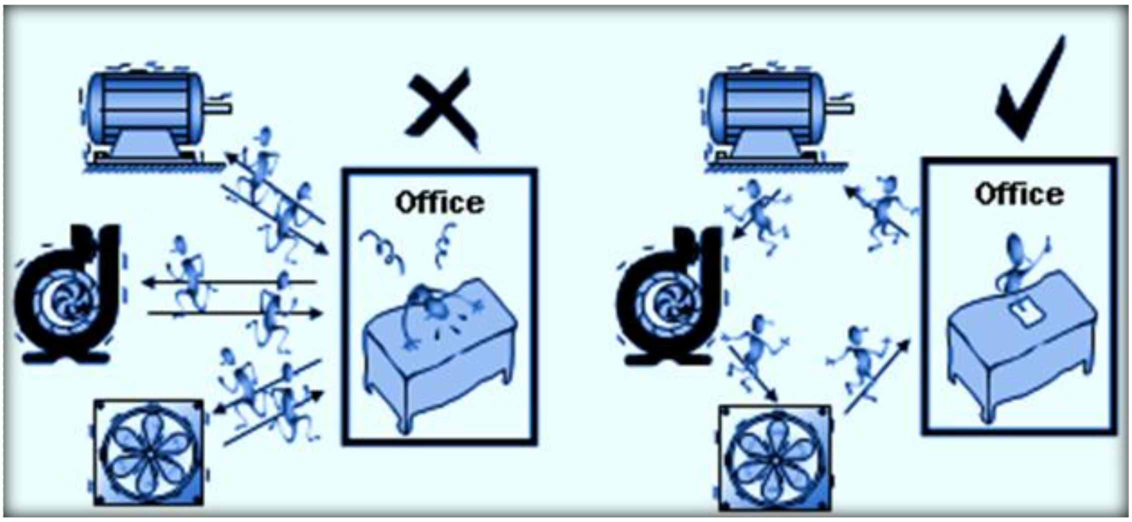


٢– كثرة نقاط القياس خلال جولة القياسات

وفي كل جولة لقياسات المعدات يتم أخذ عدد كبير من نقاط القياس. وفي معظم المصانع هناك العديد من الماكينات الحرجة "critical machines" والتي تحتاج إلى مراقبة في عدة نقاط وكل نقطة تتطلب مراقبة بإستخدام لاقط الإهتزازات وفى إتجاهات مختلفة وأحياناً بإستخدام باراميترات قياس مختلفة لتسهيل عملية تحليل الإهتزازات.

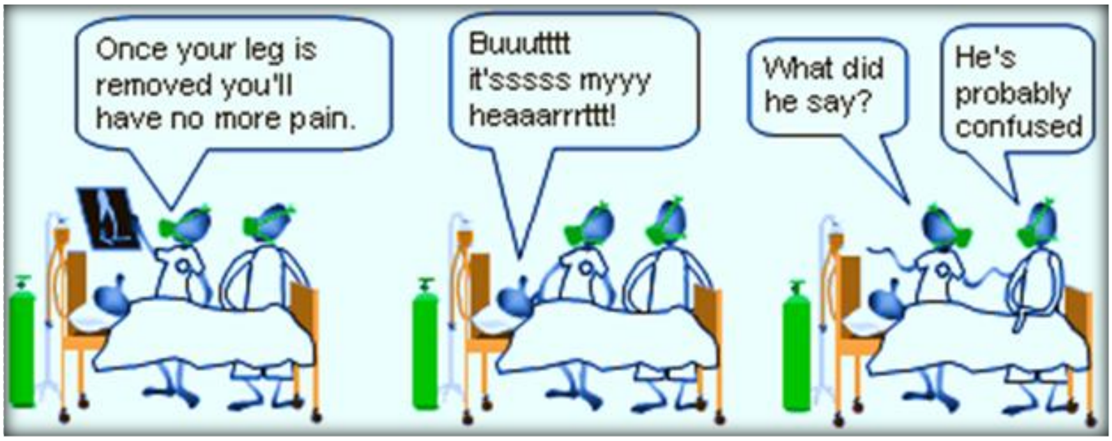


ولتجنب الأضطرار إلى التنقل بشكل متكرر بين المكتب والماكينات يجب أن تؤخذ جميع القياسات لجميع الماكينات مرة واحدة قبل إحضارها إلى مكتب التحليل.



٣- التعريف الدقيق لقائمة القياسات "recording list"

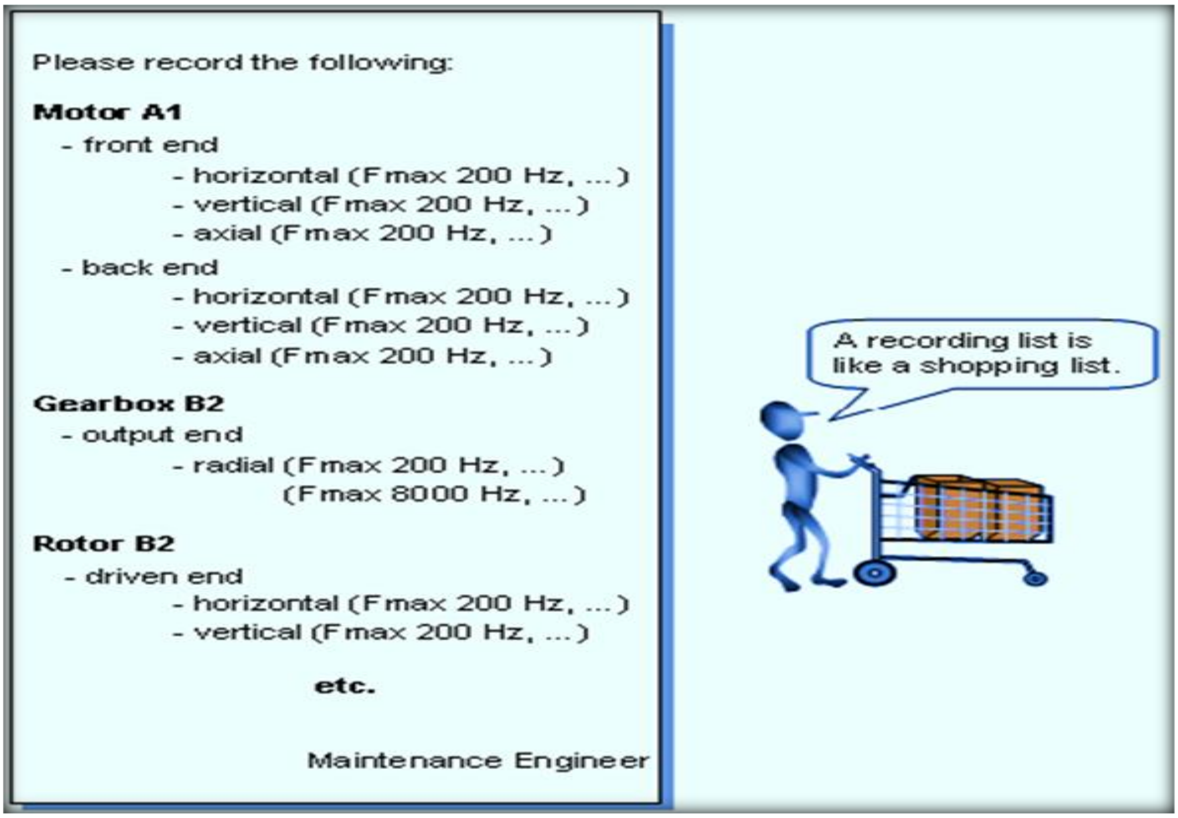
يجب أن يكون لدينا أسلوب منظم لقياس الإهتزازات وأن تؤخذ كل القياسات بدقة وبصورة منتظمة وبالتالى سيكون هناك فرصة أقل فى الخلط بين بصمات الإهتزازات لماكينات مختلفة. وإذا ما وقع هذا الخلط لبصمة الإهتزازات سيؤدى ذلك إلى إستنتاجات خاطئة وربما تؤدى إلى عواقب مكلفة.



في ضوء مصفوفة "matrix" كبيرة من القياسات التي تحتاج أن تؤخذ، كيف يمكننا ضمان أخذ هذه القياسات دائماً من المواقع "locations" المستهدفة ومن على الماكينات المراد قياسها وأن هذه القياسات لم تخلط مع بعضها البعض "confused" ولم تسقط أى منها من القائمة.

وقائمة القياسات "recording list" تظهر كل القياسات التي تحتاج أن تؤخذ في جولة جمع بيانات القياسات. وهى مثل قائمة التسوق التى تبين لنا طلبات الشراء خلال مهمة التسوق " shopping mission".

ومن خلال قائمة القياسات يمكننا أن نرى القياسات التي يجب أن تؤخذ على أي ماكينة وعند أى نقطة من نقط القياس وفى أى إتجاه وماهى باراميترات القياس المستخدمة لكل نقطة.

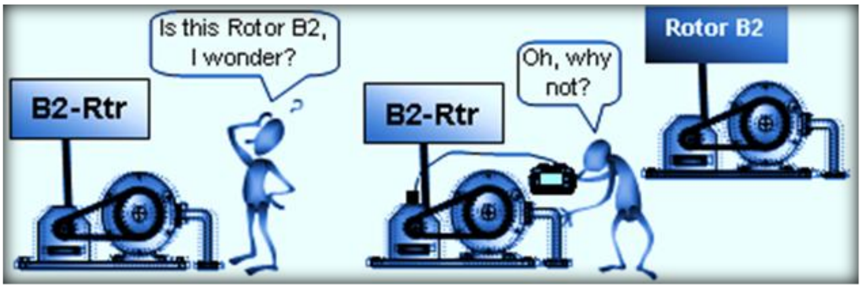


فى المثال المعروض ماكينات مختلفة يتعين علينا قياسها مثل موتور (A1) وصندوق تروس (B2) و روتور (B2). وكل ماكينة لها نقط قياس مختلفة على كل أجزائها مثل (etc.......... " Front end"، "back end"، "input end") وهكذا دواليك.

والنقطة الواحدة لها ثلاث إتجاهات يتعين قياسها وهو الإتجاه المحورى والرأسى والأفقى (كذلك باراميترات القياس التى سيتم إستخدامها).

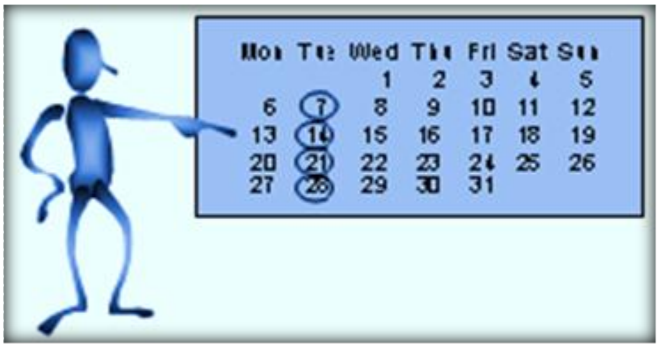
وممكن أن تتشابه المعدات كما بالشكل فى أسمائها مثل صندوق التروس (B2). ولتفادى الخلط بين المعدات عند القياس يجب أن نعطي الماكينات ونقاط القياس أسماء فريدة وذات مغزى في قائمة

التسجيل. ولإستبعاد سوء التعريف يجب التعريف الواضح لكل من إسم الماكينة ونقط القياس. وعند أخذ القياسات يجب التأكد أن إتجاه تثبيت اللاقط مطابق للإتجاه المكتوب فى قائمة القياس.



٤- وضع الخطة الشهرية والجدول الزمنى لقياس الإهتزازات

ولضمان جمع البيانات بشكل منتظم يجب عمل خطة شهرية وجدول زمني دقيق يتلائم ويتوافق مع أهمية المعدات بالنسبة للإنتاج وتاريخ الأعطال ويمكن ضبطة وتعديلة من فترة إلى أخرى مع إكتساب مزيد من الخبرة.



وهذا الجدول يبين مواعيد تنفيذ عملية جمع بيانات الإهتزازات بشكل منتظم على الماكينات بالأجهزة المحمولة "data collector".

وليس كل الماكينات فى قائمة القياسات تكون حرجة "critical" على حد سواء والماكينات الأقل أهمية يمكن مراقبتها أقل كثيراً من الماكينات الحرجة وتنقسم الماكينات من حيث الأهمية إلى:-

أ- ماكينات حرجة وهامة "Critical":-

وهى المعدات التى تؤثر فى العملية الإنتاجية بشكل مباشر وإذا حدث لها كسر مفاجىء سوف يحدث الآتى:-

- إيقاف المصنع عن العمل.
- إصلاحها يكون مكلف.
- أخذ وقت طويل فى تجهيز قطع الغيار.
- إصابة أو قتل أحد العاملين.
- التسبب فى إيقاف العاملين عن أداء عملهم.

ب- ماكينات متوسطة الأهمية "Sub-critical":-

وهى المعدات التى إذا حدث بها عطل يكون له صدى ولكن ليس له مردود على عملية الإنتاج أو على الأفراد.

ج- ماكينات أقل أهمية "Non critical":-

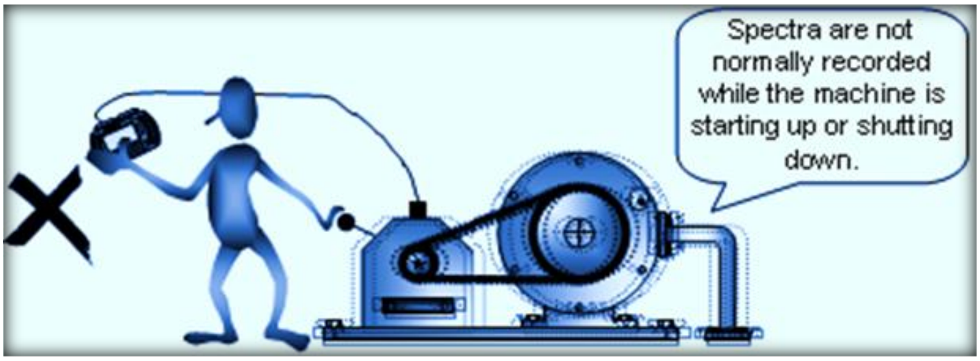
وهى المعدات التى لها إحتياطى ولا تمثل خطورة عند توقفها.

٥- الطريقة الصحيحة لقياس الإهتزازات

معظم أنواع مشاكل الإهتزازات للمعدات يتم الكشف عنها أثناء دوران المعدات وتشغيلها بسرعة ثابتة "running steadily" وبذلك تظهر بصمة الإهتزازات "spectrum" بنمط وشكل ثابت "steady vibration pattern".

أما إذا كانت الماكينة فى بدايه تشغيلها "just started up" أو تتغير سرعتها أثناء القياس فإنه يلزم إعطاء الماكينة الوقت اللازم لتكون فى حالة مستقرة قبل بدء القياسات وإلا فإن بصمة الإهتزازات التى تم قياسها لاتعكس الحالة الحقيقية لسلوك إهتزازات الماكينة.

وتقاس الماكينات فى مواقع عملها وفى ظروف التشغيل الطبيعية وأن تعمل بسرعتها القصوى (يسمح بتفاوت فى حدود ٢ إلى ٣%) ويفضل القياس عند الحد الأقصى للأحمال.



٦- تحميل وتفريغ البيانات على الكمبيوتر "Load root & dump data"

يتم تحميل مسار القياس اليومى "Load root" من برنامج الحاسب اللآلى إلى الجهاز المحمول "جامع البيانات" وبعد الإنتهاء من جولة القياسات "round of data collection" تفرغ البيانات التى تم جمعها من على المعدات "dump data" من الجهاز المحمول إلى الحاسب الآلي وذلك عن طريق كابلات للربط بين الجهاز المحمول والحاسب الآلي.

بعد الإنتهاء من تفريغ البيانات على الكمبيوتر يمكننا مسح البيانات على الجهاز المحمول وإخلاء ذاكرة الجهاز إستعداداً لجولة أخرى من جمع البيانات.

ومن المعروف أننا بحاجة إلى بطارية وسعة ذاكرة كافية لجهاز جامع الإهتزازات تكفى جولة كاملة لجمع البيانات.



٧- التحقق من صحة البيانات الملتقطة "validate the data"

هناك إحتمالات كثيرة من الأخطاء ممكن أن تحدث عند أخذ قياسات الإهتزازات منها تفكك لاقط قياس الإهتزازات "loose transducer"، تحرك "surge" الماكينة فى منتصف القياس"mid-test"، أخطاء فى ظروف التشغيل، وأكثر من ذلك.

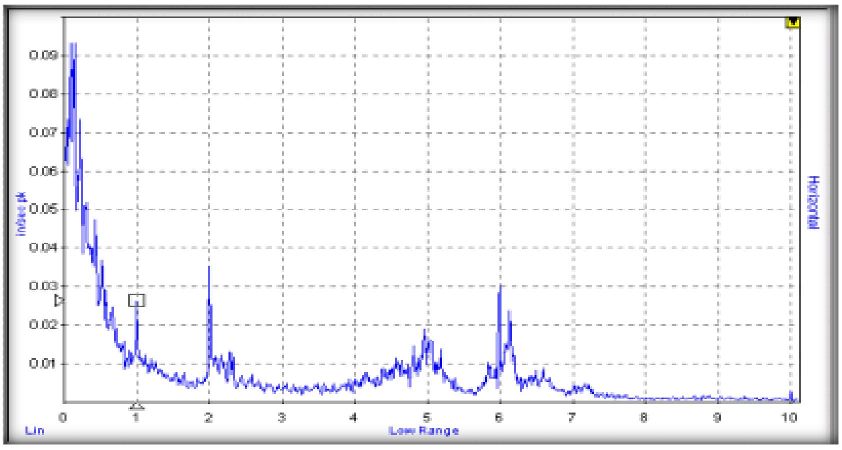
٧-١- مشاكل لاقط القياس "Transducer faults"

٧-١-١- ظهور الشكل التقليدى لمسار التزلج "ski-slope" والذى يظهر فى البصمة

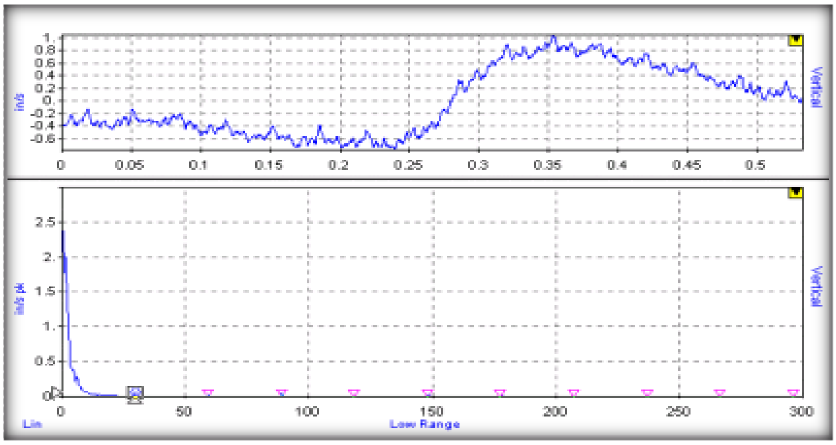
المشكلة الأكثر شيوعاً هو أن يكون العيب فى اللاقط نفسه أو طريقة تثبيته على الماكينة. وبطبيعة الحال سوف تتأكد أولاً من أن بصمة الإهتزازات تحتوى على قمم "peaks" وليس فقط القمم المتعلقة بالمشاكل الكهربية (تردد التيار الكهربى "٥٠ هرتز" ومضاعفاته).

أى أنت بحاجة إلى للتأكد من وجود بعض المعلومات الخاصة بالماكينة.

النظرة التالية هو الشكل التقليدى لمسار التزلج "ski-slope" والذى يظهر فى البصمة. إذا كنت ترى أن بصمة الإهتزازات تبدأ بمستوى عالى عند تردد منخفض، ويقل تدريجياً خلال البصمة فمن المرجح وجود مشكلة بلاقط الإهتزازات.

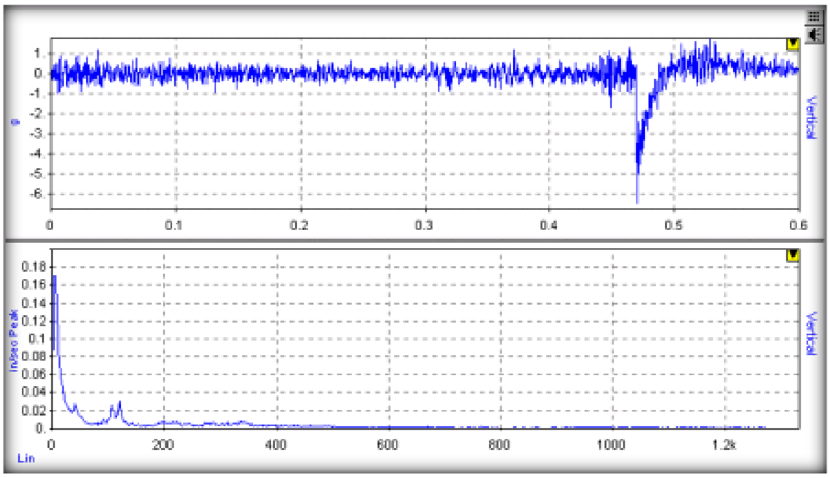


ويرجع السبب الرئيسى فى مسار التزلج "ski-slope" لنوع ما من العبور اللحظى "transient" ويمكن أن يكون ميكانيكياً وحرارياً أو كهربياً.



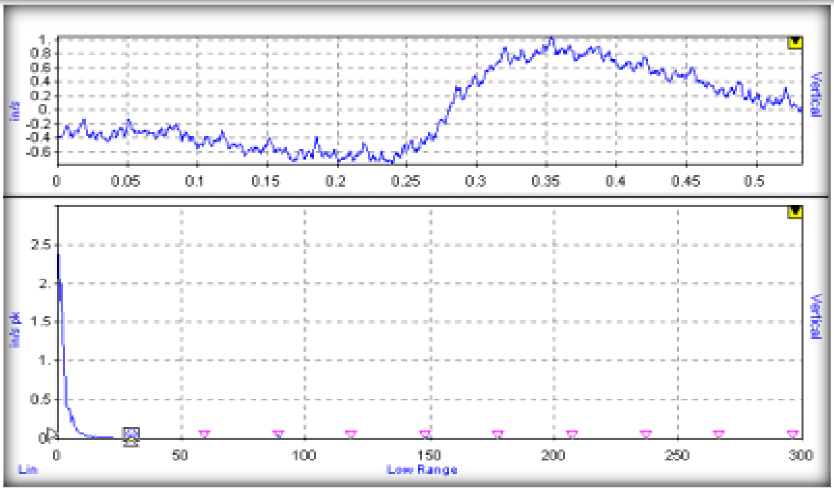
٧-١-٢- إصطدام اللاقط أثناء القياس

إذا إصطدم "knowking" اللاقط أثناء القياس، يحدث تكبير بواسطة جهاز الإستشعار "sensor" ويحدث رنه "ring" وتظهر ما يسمى مسار التزلج "ski-slope" فى البصمة.



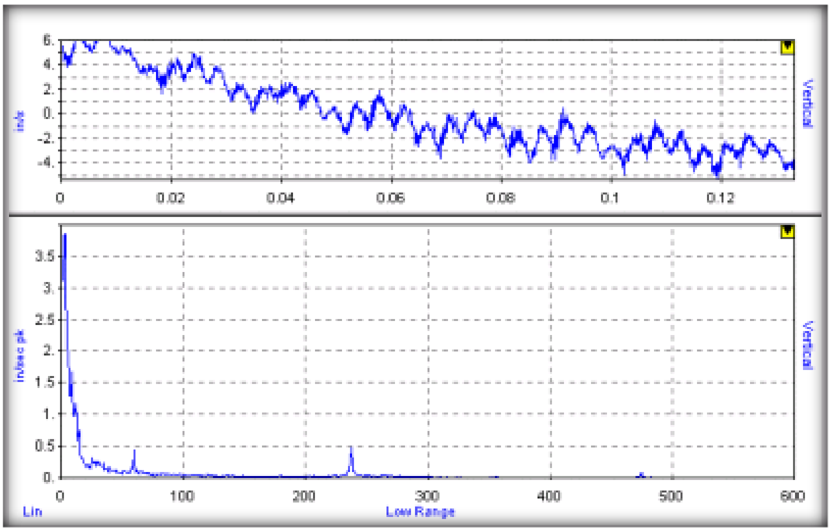
٧-١-٣- التغير المفاجئ فى درجة حرارة اللاقط

إذا كان جهاز الإستشعار "sensor" بارداً ووضع على ماكينة ساخنة جداً أو العكس صحيح، فيحدث صدمة للجهاز وسوف تتذبذب مستوياته حتى تستقر مرةً أخرى "settled". وهذا الرنين ذو التردد المنخفض جداً يسبب مرة أخرى "ski-slope" وبالتالى يتعين مراعاة ذلك.



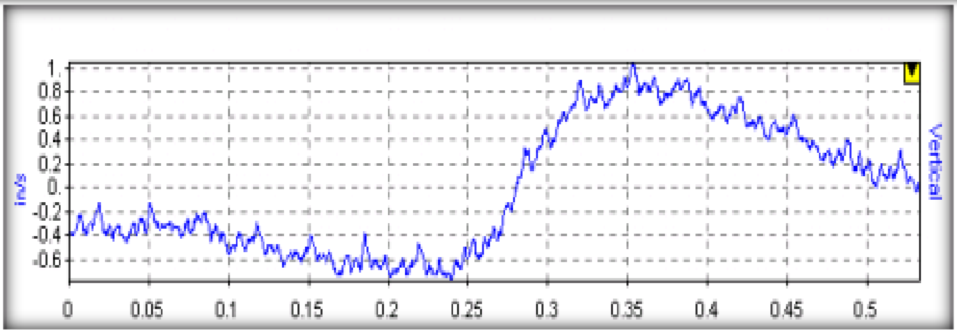
٧-١-٤- عدم إستقرار اللاقط فى بداية التشغيل

إذا تم تشغيل جهاز الإستشعار "sensor" وأخذ القياس بسرعة قبل أخذ الجهاز فرصتة للإستقرار "settle"، فسوف نرى أيضاً مرة أخرى "ski-slope".



٧-١-٥- وجود أحداث لحظية عابرة "transient event"

يجب النظر دائماً إلى الشكل الموجى "time waveform" لرؤية الأحداث العابرة " transient event". وإذا رأيت رنه "ring" عند بداية الشكل الموجى، فمن المرجح أن تكون بسبب الحرارة (على فرض أن وقت الإستقرار الكهربى للجهاز تم بشكل صحيح). فى معظم الحالات تكون الموجة الزمنية التى تم حفظها بالجهاز هى التى جمعت أولاً. ولذلك سوف ترى آثار العبور "transient" الحرارى.

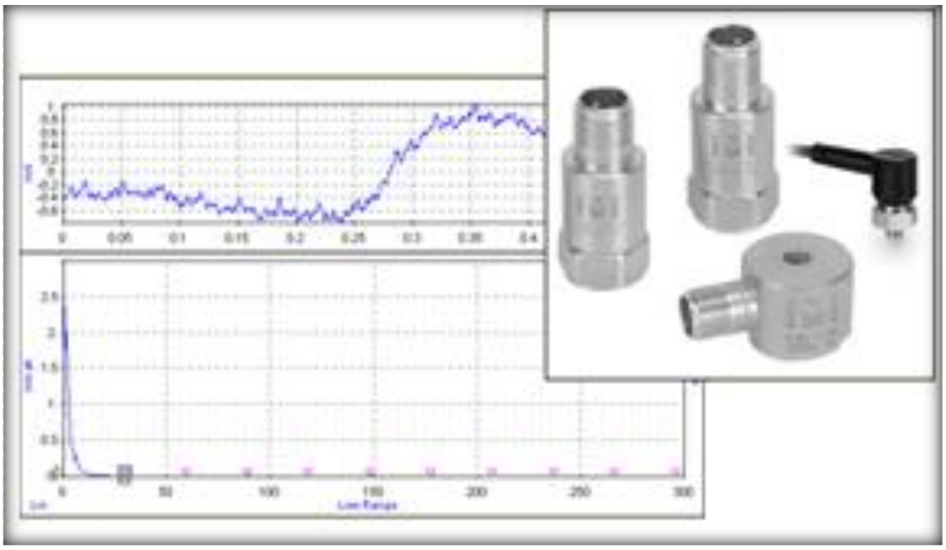


إلا إذا حدث صدمة للماكينة فى بداية القياس فإن آثار العبور "transient" فى الشكل الموجى لن تظهر فى البداية – وفى الواقع قد لا ترى ذلك على الإطلاق. والبصمة سوف تحتوى على "ski-slope" وترتفع الضوضاء "noise-floor" عند نهاية التردد العالى للبصمة إذا أصبح اللاقط مشبعاً "saturated". وهذا يمكن أن يحدث لعدة أسباب.

أولاً:- إذا كان مستوى الإهتزازات عالية جداً، يجب أن تستخدم لاقط "transducer" إهتزاز أقل حساسية "less sensitive". وبالتالى فإن كل من السرعات العالية والإهتزازات العالية فى الماكينات مثل ضواغط الهواء يمكن أن تتطلب لواقط أقل حساسية.

ثانياً:- من الممكن وجود مصدر آخر للتردد العالى "high frequency" أو إرتفاع مستوى الإهتزازات ويمكن التغلب على ذلك بتكرار نفس القياس فمن المفروض أن تصحح المشكلة، إلا إذا كان مصدر الضوضاء ثابت دائماً.

ثالثاً:- الإهتزازات عالية التردد من الممكن أن تظهر بعض المشاكل. وبالتالى يجب قياس الإهتزازات بمدى تردد عالى ومحاولة تخميد مصدر التردد العالى من (الضوضاء/الاهتزاز) بوضع وردة أو حلقة من المطاط "rubber washer" بين اللاقط ورولمان البللى للماكينة.



٧-٢- تصحيح حالات القياس "Correct test conditions"

عند قياس بصمة الإهتزازات يجب الإجابة على الأسئلة التالية، هل الماكينة تعمل فى ظروف عادية "correct condition"؟ هل يمكنك تحديد قمة "peak" سرعة الدوران؟ هل كانت الماكينة تعمل بسرعة دوران صحيحة "correct speed"؟

من السهل معرفة ما إذا كانت السرعة أو الحمل غير صحيحة، مالم تكن مختلفة لحد كبير على السرعة العادية. وسوف تحتاج إلى التحقق من معرفة إما أن البيانات تبدو "مختلفة" أو ستحتاج إلى عمل مقارنة مع بيانات أخرى لنفس النقطة.

٧-٢-١- تصحيح نقطة القياس "Correct test point"

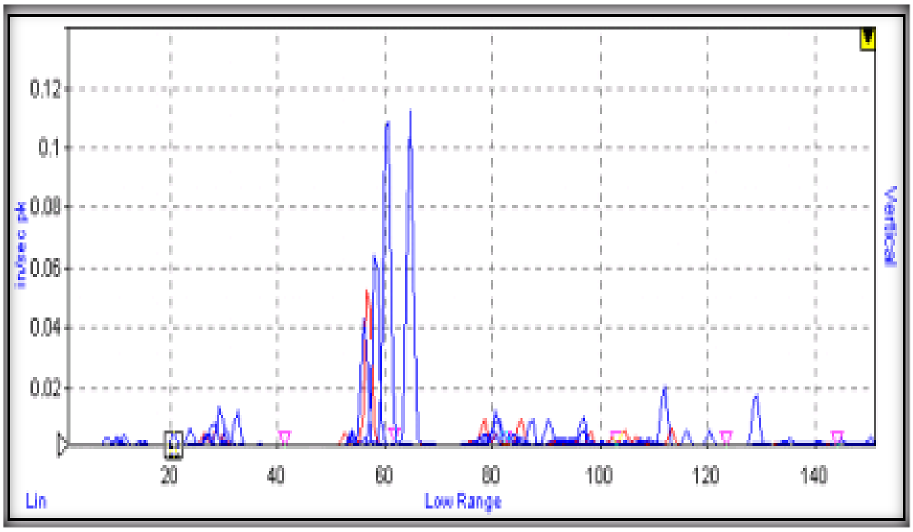
يجب التأكد من صحة البيانات التى تم قياسها على الماكينة لمعرفة ما إذا كان تم جمعها من نقطة القياس الصحيحة وكذلك الإتجاه الصحيح (العمودي، الأفقي والمحوري). وهذا خطأ من الوارد أن يحدث وهو إما جمع القياسات من نقطة خطأ "wrong point"، أو من ماكينة خطأ " wrong machine" (مثلا ماكينة "A" بدلاً من ماكينة "B"). هذه الأخطاء غالباً ما يتم تصحيحها طالما تداركت هذا الخطأ وأنت مازلت فى الموقع.

عليك ببساطة أن يكون فى تفكيرك دائماً أن أى بيانات تم جمعها من الممكن أن يتم جمعها من المكان غير الصحيح أو فى ظل ظروف غير صحيحة.

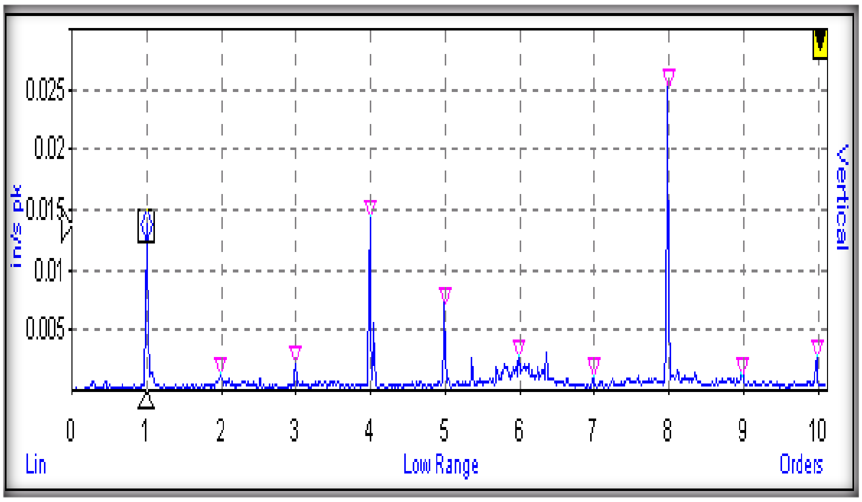
٧-٢-٢- تحديد سرعة الدوران (قمة "peak")

الأن تأكدنا من أم اللاقط مثبت بالطريقة الصحيحة "mounted correctly"، ومثبت فى المكان الصحيح بالماكينة، وبالتالى ينقصنا فحص واحد فقط هو التأكد من صحة سرعة الدوران للماكينة.

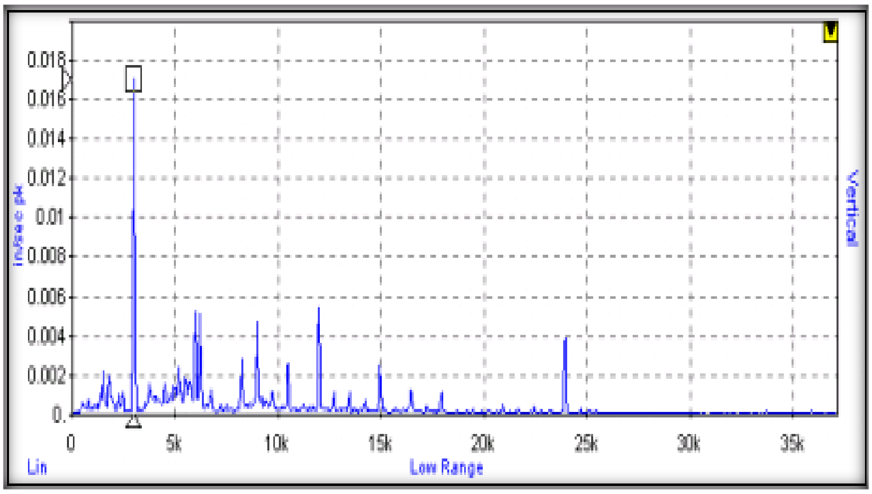
إذا كان النظام الذى تستخدمه مصمم لتحديد سرعة الدوران الماكينة تلقائياً (إما بإدخالها بالموقع أو تحليل البيانات أوتوماتيكياً)، ومن ثم يجب التحقق للتأكد من صحة هذه البيانات.



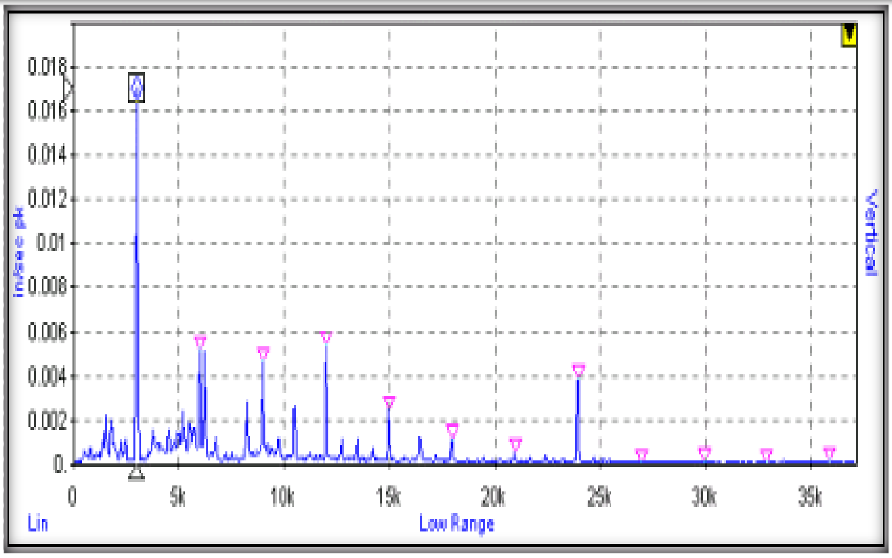
وللعلم بأن معرفة سرعة الدوران هو أمر بالغ الأهمية لعمل تحليل دقيق لبصمة الإهتزازات. نحن دائماً نبحث عن قمم "peaks" فى بصمة الإهتزازات لمضاعفات سرعة الدوران، وبالتالى يمكننا تحديد القمم الأخرى المتبقية بالبصمة.



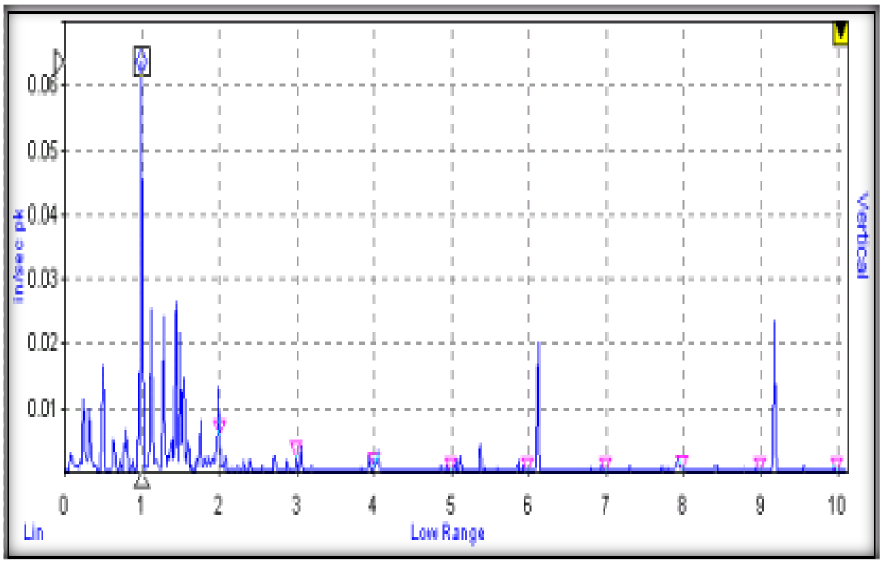
في كثير من الحالات قمة "peak" X١ سوف تكون واضحاً تماماً. وعندما لا تكون واضحة عليك بالبحث عن قمة معروفة لمضاعفات سرعة الدوران ثم ترجع إلي الخلف (معنى ذلك يمكننا العثور على قمة X٦ وقسمة التردد على ٦ يمكننا الحصول على سرعة الدوران) أو الإنتقال السريع إلي نقطة أخرى بالماكينة تكون السرعة فيها أكثر وضوحاً على إفتراض أن السرعة لم تتغير.



وفى بعض الحالات يصبح من الصعب التعرف بسرعة على قمة سرعة الدوران ومضاعفاتها. وعلى الرغم من وضع علامات التوافق "harmonic markers" على قمة سرعة الدوران لتحديد "order" هذه الترددات، وبالتالى أفضل طريقة هى إختيار "order" لبصمة الإهتزازات. ولذلك فإننا نوصي بأن تعرض البصمة بشكل "order" بحيث يكون المحور السينى "x-axis" ليس بالهرتز (دورة/ثانية) ولكن CPM (دورة/الدقيقة).



عند إختيار "order"، فإن المحور السينى "x-axis" يظهر عليه علامات على فترات لسرعة الدوران ويمكنك أن ترى بوضوح القمم المنسوبة لسرعة الدورن ودون الحاجة إلى القيام بأي شيء يمكنك أن ترى بشكل سريع جداً إذا كان لدينا أي قمم متزامنة مع سرعة الدوران " synchronous peaks" (مضاعفات سرعة الدوران) أو أي قمم غير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous peaks" (مضاعفات غير صحيحة من سرعة الدوران) وأيضاً معرفة ما إذا كان هناك أي قمم أقل من سرعة الدوران "sub-synchronous peaks" (قيمة غير صحيحة من سرعة الدوران).



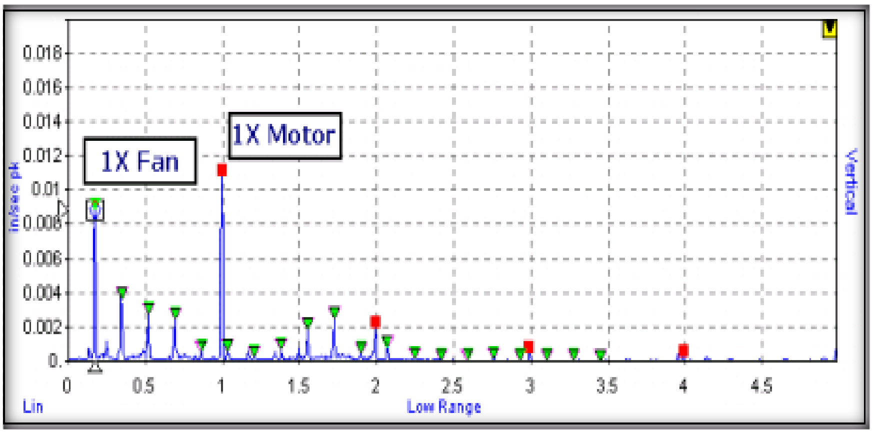
يجب ضبط برنامج تحليل الإهتزازات على الحاسب الآلى لتوفير الجهد والعمل. بحيث يتم تطبيع بصمة الإهتزازات للتعرف على البيانات التى تحتويها بسرعة وبدون عناء وبذلك يمكننا توفير الوقت والجهد وتقليل إحتمالات الخطأ.

عندما تكون الماكينة أكثر تعقيداً فعلى سبيل المثال تحتوى على إثنين أوأكثر من الأعمدة "shafts" (يوجد سيور"belt"، صندوق تروس"gearbox"، كوبلنج "fluid coupling"، الخ)، وبالتالى يصبح من الصعب معرفة البيانات التى تحتويها البصمة.

وعند ضبط بصمة الإهتزازات لمعرفة القمم المنسوبة لسرعة الدوران الخاصة بالعمود الأساسى "reference shaft"، فإن القمم الأخرى المنسوبة للأعمدة الأخرى لاتظهر. ومن الصعب معرفة القمم الغير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous peaks" (وهى مشاكل مرتبطة برولمان البللى، الرنيين، إلخ)، أو المنسوبة لعمود آخر مختلف.

بعض حزم البرمجيات تسمح لك بتحديد هذه الترددات فى وقت مبكر (الترددات الإساسية) وتضع علامات على قمم تلك الترددات لتحديد إرتباط تلك القمة بمختلف الأعمدة والأجزاء الدوارة.

وتحتاج لدراسة دليل برنامج تحليل الإهتزازات الخاص بك لمعرفة ما إذا كانت هذه الميزة متاحة أم لا.



٨– قياس الإهتزازات بتكنولوجيا (PeakVue)

تكنولوجيا "PeakVue" هى إحدى القياسات الخاصة "special measurements" وتسمى تكنولوجيا مقدار الذروة أو القمة "Peak values" والتى يطلق عليها "PeakVue" هي براءة إختراع لشركة إيمرسون "Emerson" لتحليل موجات الإجهاد "Stress Wave Analysis" عن طريق فصل الترددات العالية جداً "very high frequency" وموجات الإجهاد "stress waves" ذو الفترة القصيرة "short duration" من بيانات الإهتزازات العادية المنتظمة " regular vibration data".

وتوفر هذه التكنولوجيا رؤية متكاملة للعيوب الميكانيكية التى غالباً ماتكون غير مرئية " not visible" فى تحليل الإهتزازات للقياسات العادية الأخرى "standard Vibration". وتستخدم تكنولوجيا "PeakVue" المعالجة الرقمية "digital processing" ومعدلات أخذ العينات " sampling rates" أثناء قياس الإهتزازات تتم بسرعة فائقة حيث يتم أخذ ١٠٠,٠٠٠ عينة فى الثانية الواحدة.

هذا المعدل السريع لأخذ العينات يسمح بإلتقاط بيانات ثابتة أثناء القياس بغض النظر عن سرعة دوران الماكينة (بطيئة أو سريعة) مما يجعلها أداة ممتازة "excellent tool" إذا إستخدمت فى التطبيقات الأخرى ذات السرعات البطيئة "slow speed application".

وموجات الإجهاد "stress waves" تظهر نتيجة عيوب فى أجزاء الماكينات مثل رولمان البللى "bearing defects"، التزييت "lubrication faults"، الإحتكاك "rubs"، التكهف "cavitation"، التشققات "cracks"، تفككات التروس "gear looseness" أو مشاكل البكلاش "backlash" إلخ.

وعليه فإن الصدمات "impacts" الناتجة من الأجسام الصغيرة "smaller object" تنتج موجات إجهاد "stress waves" بترددات عالية "higher frequency stress waves" مقارنةً بالأجسام الكبيرة "larger objects".

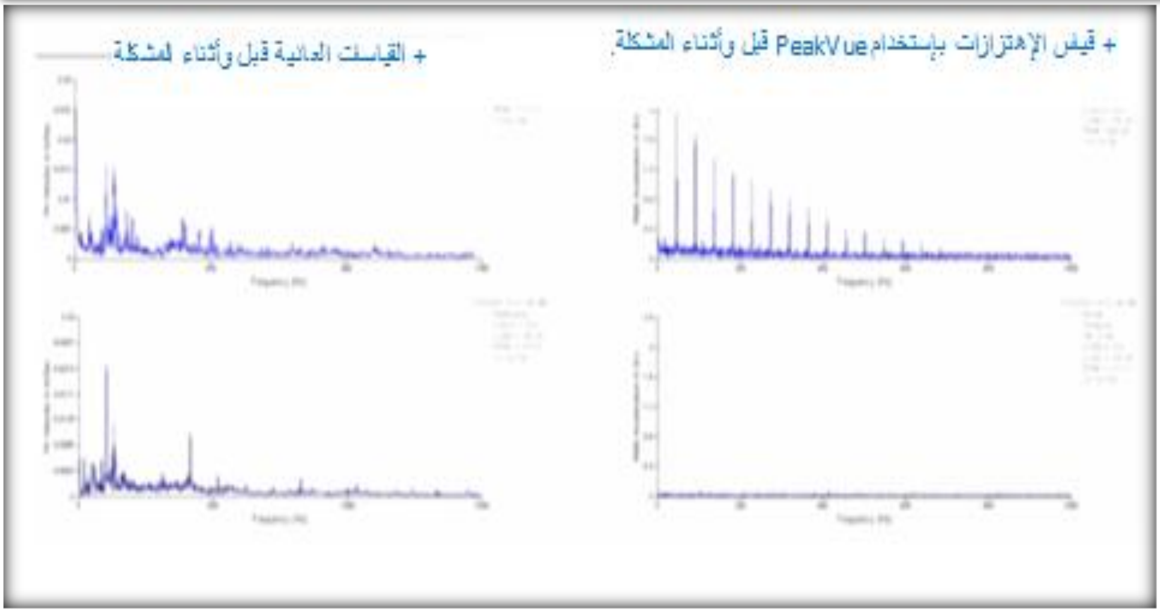
"PeakVue " أيضاً يجعل من الممكن إلتقاط وعرض موجات الإجهاد العابرة " transient stress waves" بسعتها الحقيقية "true amplitude" بإستخدام نظام خاص لإلتقاط الإشارات " signal capture system" والناتجة من كل من الاحتكاك "friction"، الصدمات "impacting"، اللحام الدقيق "micro-welding"، الإنهيار "fatiguing".

٨-١- مقارنة بصمة الإهتزازات بإستخدام PeakVue وبالقياسات العادية "normal vibration"

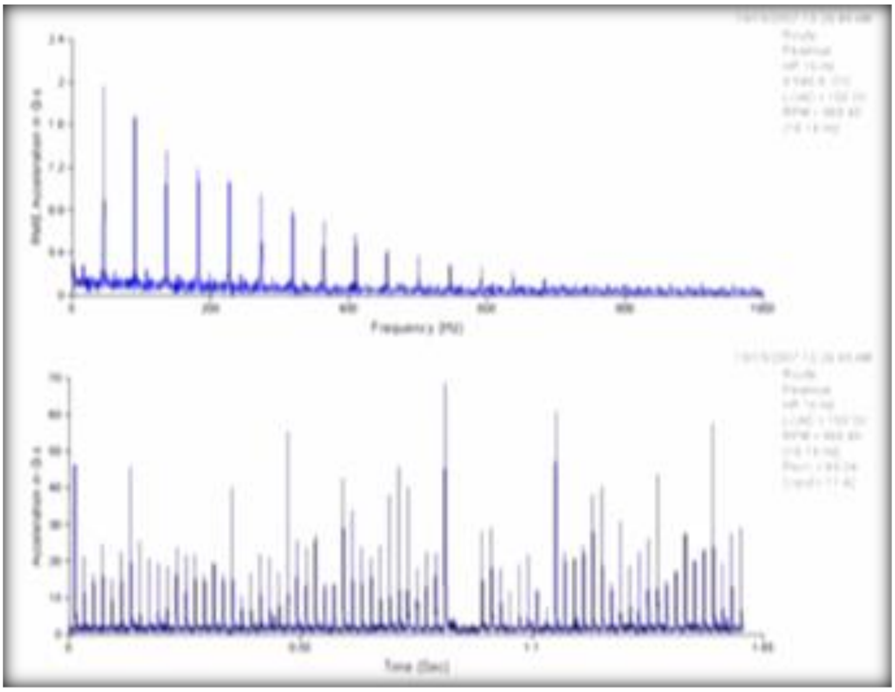
على الجانب الأيسر ترى بصمة الإهتزازات العادية المأخوذة على رولمان البللى قبل وأثناء المشكلة. نلاحظ عدم وجود إشارة لافته فى بصمة الماكينة توحى بوجود مشكلة.

أما على الجانب الأيمن ترى بصمة الإهتزازات بإستخدام تكنولوجيا "PeakVue" والمأخوذة أيضاً على رولمان البللى قبل وأثناء المشكلة. نلاحظ أن هناك فرق واضح وأن المشكلة من السهل التعرف عليها.

مما سبق نرى أن مشكلة رولمان البللى غير ظاهرة بالقياسات العادية "Normal Route" أى لا توجد علامات تشير إلى وجود مشاكل ولكننا سهل التعرف عليها بسهولة بإستخدام "PeakVue".



بصمة "PeakVue spectrum" التالية تظهر مؤشر واضح لمشكلة روللمان البللى ومنحنى الشكل الموجى "waveform" يظهر بالتفصيل وجود صدمات حادة "sharp impacting" تصل حتى إلى ٧٠ g's.



٨-٢- فوائد إستخدام "PeakVue" فى قياسات الإهتزازات

١- نوصى بإستخدام "PeakVue" على جميع رولمان البللى لأنه مفيد فى الإكتشاف المبكر للعيوب.

٢- "PeakVue" مفيد للغاية فى تطبيقات السرعات البطيئة، والماكينات المعقدة.

٣- جهاز تحليل وقياس الإهتزازات مزدوج القنوات "dual channel" يقيس الإهتزازات بإستخدام "PeakVue" على القناة الثانية وبالتالى لا يأخذ مزيداً من الوقت فى القياس.

القسم الرابع:- المخطط العام لقياس الإهتزازات

الرسم البياني التالى يظهر مخطط عام لأساسيات قياس وتحليل الاهتزازات بإستخدام لاقط الإهتزاز "accelerometer".

١- عرض المستوى العام للإهتزاز "Overall vibration display"

العمود الأيسر من الرسم البياني السابق يبين عرض المستوى العام للإهتزازات " Overall vibration display" حيث تظهر قيمة المستوى العام للإهتزازات عند إختيار إحدى أنواع القياس (العجلة – السرعة – الإزاحة).

وللحصول على قيمة المستوى العام للإهتزازات نحن بحاجة لحساب RMS .

الأنماط القديمة لقياس الإهتزازات "vibration meters" قادرة على حساب قيم RMS باستخدام دوائرتناظرية بسيطة "simple analogue circuits". ولكن أجهزة القياس الحديثة تفعل الشيء نفسه من خلال عملية أكثر تعقيداً للتحويل الرقمى للإشارة.

قياس المستوى العام للإهتزاز عادةً مايعبر عنه على أنه قيمة "RMS" (بإستثناء الإزاحة عند تطبيق "peak-peak values") ويشكل أساس قياسات مراقبة الماكينات.

ومن الشائع جداً عمل منحنى الإطراد "trending" للمستوى العام للإهتزازات لقيم العجلة أو السرعة لمعرفة الزيادة أوالتغير الحادث فى قيمة الإهتزاز لإعطاء إنذار مبكر للمعدات وهذا هو الشكل الأساسى فى مراقبة الإهتزازات "vibration monitoring" ولكنه له قدرة محدودة فى التحليل.

لاحظ أنه فى حالة إستخدام المجسات اليدوية "hand-held meters" يتم قياس المستوى العام للإهتزازات بإستخدام "High Frequency Detection (HFD)" لمعرفة الخلل فى كراسى التحميل وهو النظام المعتاد إستخدامه فى المجسات اليدوية و نادراً ما يستخدم للمراقبة ولكنه يستخدم أساساً فى تحليل الهياكل العمرانية.

١-١- فى حالة إختيار العجلة

كما فى مخطط قياس الإهتزازات التالى بمجرد وضع لاقط الإهتزاز لقياس الإهتزازات على المعدة يكون خرج لاقط الإهتزاز "accelerometer" عبارة عن قيمة الإهتزازات (Acceleration G's RMS ١.٢). وتمثل هذه القيمة المستوى العام للإهتزازات فى حالة إختيار العجلة.

والعجلة "acceleration" (RMS) هو المقياس المستخدم عند الترددات العالية أو الصدمات "impact forces" مثل رولمان البللى أو صناديق التروس لأنها تعبر أحسن تعبير عن مستوى الطاقة ووحداتها الجيز "G's".

ويمكن التعبير عن العجلة "Acceleration" بالقيمة الحقيقية (RMS –M/sec2) أو بوحدة الجاذبية الأرضية "G's" حيث (1g = 9.81 m/sec2) تقريباً.

١-٢- في حالة إختيار السرعة

بإجراء التكامل الأول للعجلة يتم إختيار السرعة وتظهر أيضاً قيمة الإهتزازات (Velocity ٢.٦ mm/sec RMS) وتمثل هذه القيمة المستوى العام للإهتزازات فى حالة إختيار السرعة ويمكن التعبير عن السرعة "velocity" بالقيمة الحقيقية (mm/sec RMS).

والسرعة "velocity" (RMS) هو المقياس الأكثر شيوعاً لقياس إهتزازات الماكينات فى مدى واسع للتردد "10-1000Hz" ولهذا السبب تعتبر المقياس العالمى لتقييم سلامة الماكينة.

١-٣- في حالة إختيار الإزاحة

نتيجة التكامل المزدوج لإشارة العجلة "acceleration" يمكن الحصول على سعة الإزاحة "displacement amplitude" وربما تكون مصاحبة لضوضاء "noisy" نتيجة لذلك. ويمكن التعبير عن الإزاحة "displacement" بالقيمة الحقيقية (microns peak-to-peak). وتظهر أيضاً قيمة الإهتزازات على الرسم (50 microns peak-to-peak) وتمثل هذه القيمة المستوى العام للإهتزازات فى حالة إختيار الإزاحة.

والإزاحة "displacement" هو القياس المستخدم لمعرفة قيمة المستوى العام للإهتزاز "Overall value " لقياس الهياكل العمرانية ومحركات الديزل و الماكينات ذو السرعات المنخفضة.

١-٤- جدول وحدات السعة "Amplitude units"

والجدير بالذكر أن وحدات السعة "Amplitude units" لجميع بارامترات الإهتزازات المقاسة تشمل الآتى:-

- مقدار السعة "Magnitude" لكل من (الإزاحة – السرعة – العجلة).
- فترة التردد "Period" ويمكن قياسة (Order – CPM - Hz).
- زاوية الطور "Phase angle" وتقاس (Degrees , Radian).

والجدول الآتى يوضح وحدات السعة ونوع القياس المناسب.

إسم بارامتر القياس	السرعة المناسبة	إختيار نوع القياس	الوحدات فى النظام المترى	الوحدات فى النظام الإنجليزى
الإزاحة Displacement	السرعة أقل من (١٠ هرتز) أى أقل من ٦٠٠ RPM	P-P	mm & Micron	mils
السرعة Velocity	السرعة من (١٠–١٠٠٠ هرتز) أى من ٦٠٠ إلى ٦٠٠٠ RPM	PK ,RMS	mm/s & m/s	In/sec
العجلة Acceleration	السرعة أكبر من (١٠٠٠ هرتز) أى أكبر من ٦٠٠٠ RPM	PK ,RMS	mm/s2 , m/s2 & g's	In/sec2 & g's

حيث:-

- Micron = ٠.٠٠١ mm ، mils = ٠.٠٠١ inch ،
- g's (gravitational constant) = ٣٨٦ in/s2 أو = ٩٨٠ mm/s2

٢– حساب ترددات بصمة المعدات "Calculation of Frequency Spectra"

العمود الأيمن من مخطط قياس الإهتزازات يبين العمليات الأساسية والتي فيها يمكن تحويل الموجة الجيبية إلى طيف الترددات لكى يتمكن محلل الإهتزازت من معرفة من أين تأتى طاقة الاهتزاز. تحليل تردد الإهتزازات هو جوهر تحليل الاهتزاز وهو يعطى قرارات مرضية لمعظم مشاكل الماكينات.

بصمة العجلة "acceleration spectrum"

ضرورية لتحليل الأعطال "impact faults" لصناديق التروس والماكينات ذو السرعات العالية.

بصمة السرعة "velocity spectrum"

تعطى مدى واسع للتردد "10-1000Hz" وبها يتم تحديد مشاكل الماكينات مثل عدم الاتزان ، التفكك وعدم المحاذاة، الخ.

بصمة الإزاحة "displacement spectrum"

نادراً ما تستخدم للمراقبة ولكنها تستخدم أساساً فى تحلبل الهياكل العمرانية.

٣– الرسم البيانى للمخطط العام لقياس الإهتزازات

المعالج FFT والعرض

عرض المستوى العام للإهتزاز

بصمة الإزاحة نادراً ما يستخدم للمراقبة ولكنه يستخدم فى تحليل الهياكل العمرقية

وقت الإزاحة

50.0
الإزاحة
ميكرون PK-PK

الإزاحة هو القياس المستخدم لمعرفة قيمة المستوى العام للإهتزاز لقياس الهياكل العمرانية ومحركات الديزل و الماكينات ذو السرعات المنخفضة.

تكامل

بصمة السرعة يحدد مشاكل الماكينات مثل عدم الاتزان. التفكك وعدم المحاذاة. الخ

وقت السرعة

2.6
السرعة
مم/ث RMS

السرعة هو المقياس الأكثر شيوعا لقياس إهتزازات الماكينات فى مدى واسع للتردد "10-1000Hz" وتعتبر المقياس العالمى لتقييم سلامة الماكينات.

تكامل

بصمة العجلة ضرورية لتحليل الأعطال لصناديق التروس والماكينات ذو السرعات العالية

وقت العجلة

1.2
العجلة
G,RMS

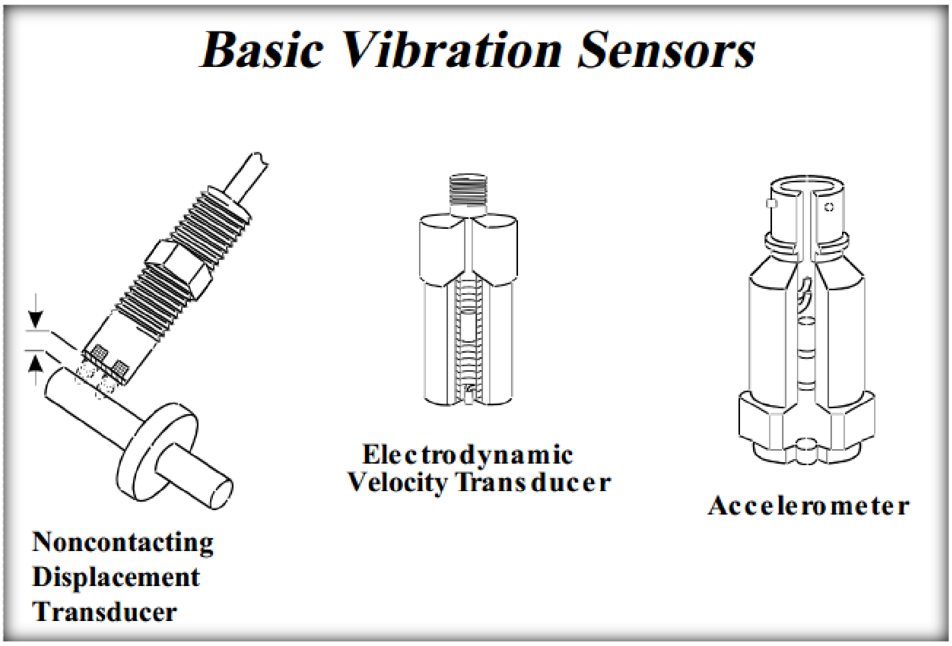
العجلة هو المقياس المستخدم عند الترددات العالية أو الصدمات مثل رولمان البلى أو صناديق التروس.



مخطط عام لقياس الإهتزازات

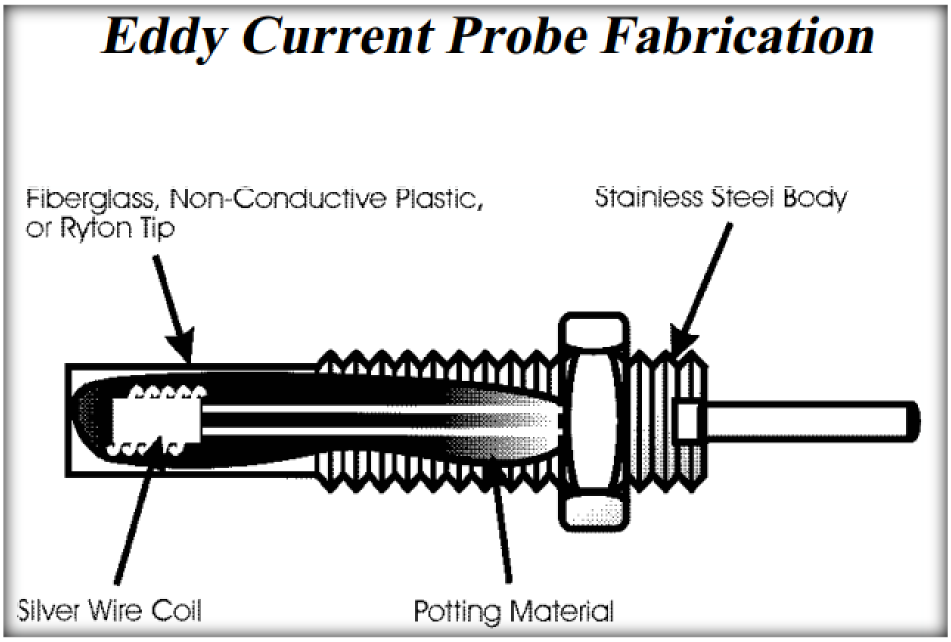
٤- أنواع أجهزة الإستشعار "Transducer types"

يجب أن نفهم الفرق بين العجلة والسرعة والإزاحة. وسوف ننظر الآن إلى أنواع مختلفة من أجهزة الإستشعار المستخدمة لكل نوع من أنواع القياس، وسوف نشرح فيما يستخدام كل نوع.



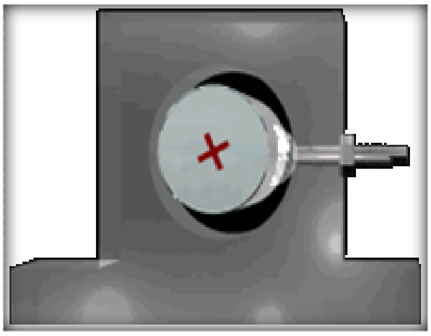
٤-١- أجهزة إستشعار الإزاحة "Displacement transducers"

أجهزة إستشعار الإزاحة تقيس فى الواقع الحركة النسبية بين العمود وطرف "tip" اللاقط. وذلك بدلاً من تثبيته على السطح الخارجى للماكينة، ويتم عمل فتحة "drill" داخل سبيكة كرسى التحميل. وبالتالى هو مثبت بشكل دائم "permanently mounted".

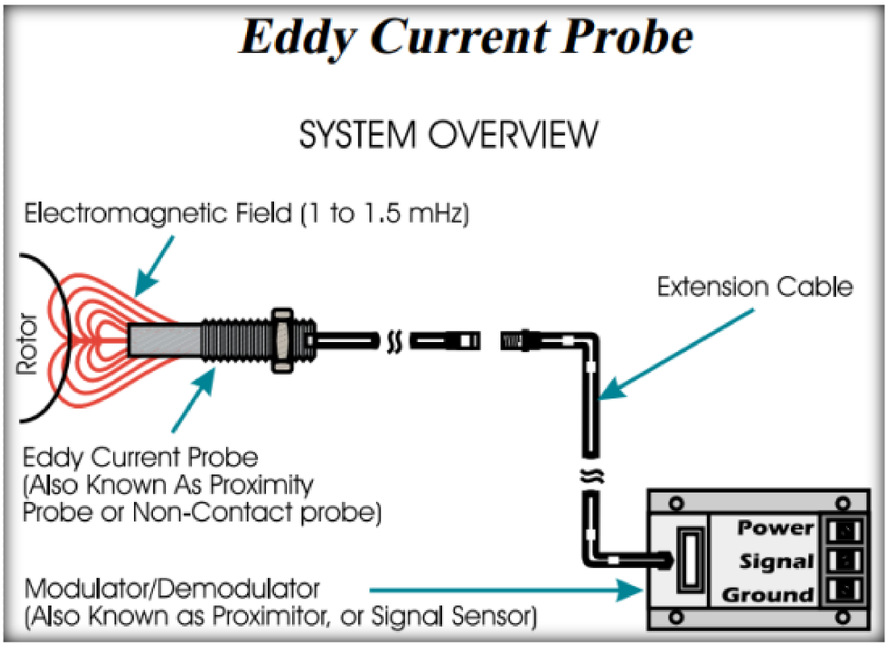


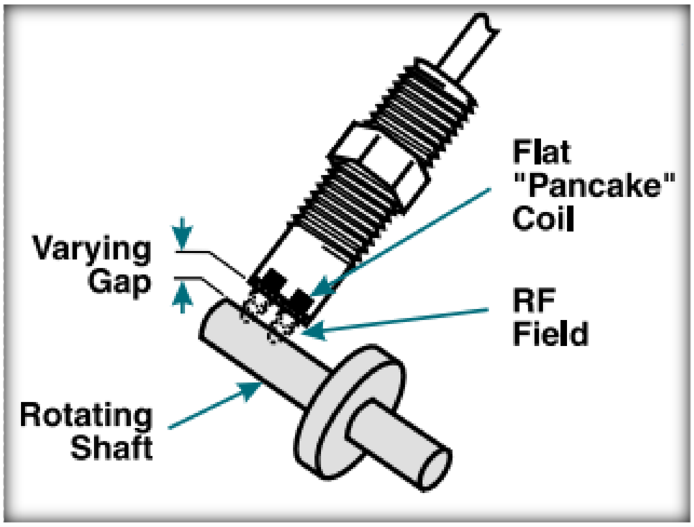
وجهاز إستشعار الإزاحة يستخدم فى المراقبة الدائمة للمعدات بهدف حماية "protection" سبائك كراسى التحميل للماكينات مثل التربينات والطلمبات والمراوح الكبيرة. ومن الممكن توصيل جهاز

جامع الإهتزازات المحمول على خرج أجهزة الإستشعار لقياس بصمة الإهتزازات وتحليل منحنى الطور.



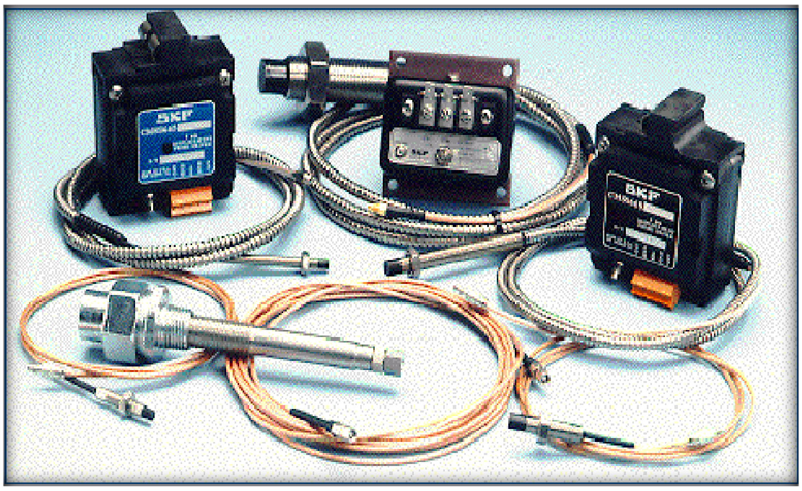
وجهاز إستشعار الإزاحة يسمى مجس التيارات الدوامية "Eddy Current Probes". ويسمى أيضاً المجس الغير متلامس "non-contact probes" وتجارياً يسمى مجس بروكسيمتى " Proximity probes" وجميعهم يعمل بنفس المبدأ.





ويتكون مجس الإزاحة من ثلاثة أجزاء هى: القائد "driver" والمجس "probe" والكابل "cable" بينهما.

يتم تغذية القائد "driver" بالفولت الذى يولد إشارة الترددات اللاسلكية "RF signal". وتبث هذه الإشارة خلال الكابل إلى المجس.



ملف "coil" داخل طرف المجس "probe tip" يكون بمثابة هوائى "antenna" ويشع "radiates" طاقة تردد عالية "high frequency energy" إلى الثغرة "gap" فتولد مجال مغناطيسى. وأى مادة موصلة خلال المجال المغناطيسى تمتص الطاقة وتولد تيارات دوامية "eddy currents" فى المواد (العمود)، ومن هنا جاءت تسميته.

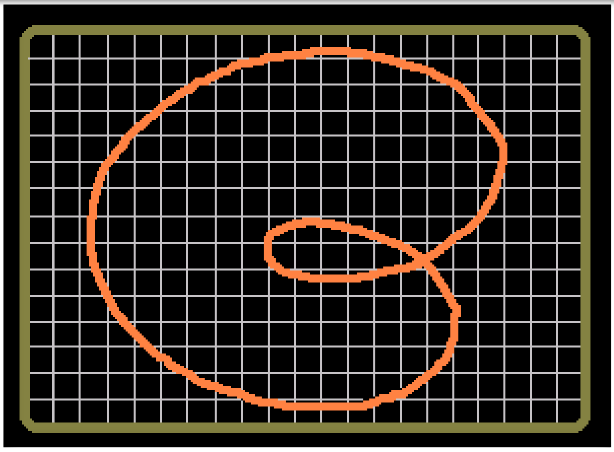
إمتصاص المجال المغناطيسى يتسبب فى أن خرج المجس ينخفض بمقدار يتناسب مع مسافة الفجوة "gap distance". وكلما تغيرت المسافة للعمود بشكل ديناميكى تغيرت إشارة الخرج.

القائد "driver" يعمل بمثابة مستخلص "demodulator" وكاشف "detector" وله خرجين. والخرج الديناميكى يعرض الشكل الموجى "time waveform" الذى منها تشتق كل من البصمة والمستوى العام "overall level".

وهناك أيضاً جهد التيار المستمر "DC voltage" يتناسب مع متوسط مسافة الثغرة " average gap distance".

وإشارة ثغرة التيار المستمر "DC gap signal" تستخدم أيضاً فى نظام المراقبة لتحديد مكان العمود نسبة إلى البللى.

عادةً يتم أخذ قراءة الفجوة عندما يكون العمود ساكن "at rest"، وبعد ذلك عندما تصل الماكينة إلى سرعتها (كما فى التربينات) يتم مراقبة ثغرة الفولت "gap voltage". ومن هذه المعلومات يمكننا إكتشاف إحتكاك العمود "shaft rub"، ويتولد رسم بيانى ومن خلاله معرفة الإحتكاك (للأوربت "Orbit plots").



عرض الرسم البيانى للأوربت "Orbit plots" هوالقياس الأكثر شيوعاً لتحليل إهتزازات التوربينات الكبيرة. حيث يتم تثبيت إثنين من مجسات البروكسمتى "proximity probes" عند ٩٠ درجة من بعضهما البعض (متعامدان)، ويتم رسم الإشارتان فى "محورى x،y ". والرسم البيانى للأوربت يشير إلى حركة مركز العمود "shaft" داخل سبيكة كراسى التحميل. وهذا يتيح لمحلل الإهتزازات ليرى حركة العمود داخل سبيكة كرسى التحميل "Journal bearings". حيث من الممكن للعين المدربة كشف مشاكل عدم الإتزان وعدم السنترة ومجموعة أخرى من المشاكل.

أى تشققات فى العمود يمكن كشفها بهذه الطريقة كلما تغيرت الحركة الديناميكية للعمود "shaft". ومجموع البرامج المتقدمة "advanced software" تمكنا من النظر إلى الحركة الديناميكية للعمود بالكامل من خلال فحص الإشارات من كل مجسات التيارات الدوامية "eddy current probes"، بالإضافة إلى اللاقط الموضوع على السطح الخارجى إن كان ذلك ممكناً.

المزايا:

١- استجابته منخفضة للتردد.

٢- يقيس الإزاحة النسبية الفعلية للعمود خلال سبيكة كرسى التحميل.

٣- فيه موثوقية (عند تركيبه بالشكل الصحيح).

العيوب:

١- صعبة ومكلفة فى تركيبها.

٢- لا يمكن استخدامها لقياس الترددات العالية.

٣- معايرتها (تحديد النسبة بين خرج الفولت والإزاحة الفعلية) يعتمد على نوع مادة العمود (المواد المختلفة تمتص الطاقة بمعدلات مختلفة).

٤- رفة العمود "run out" وأخطاء السطح ينتج عنها إشارات مزيفة "false signals".

التطبيقات:

١- تستخدم عادةً للماكينات ذات السرعات المنخفضة عادة أقل من ٦٠٠ CPM أى ١٠ هرتز)

٢- يستخدم فى الإتزان الديناميكى بسبب الترشيح filtering عند سرعة الدوران ١ X RPM.

الوحدات:

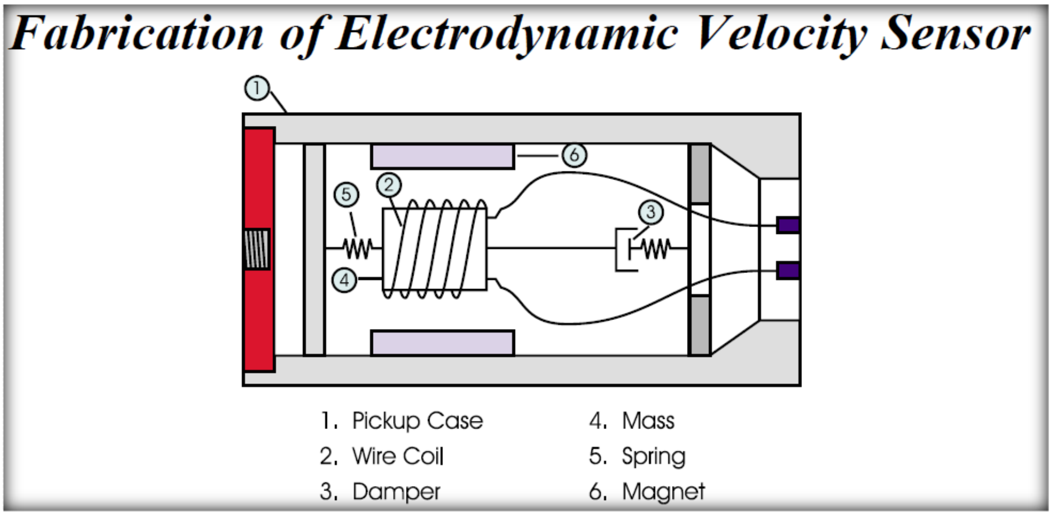
* الوحدة هى الميلز "PK-PK" أو ميكرون "PK-PK" حيث أن (١ مل = ٠.٠٠١).

٤-٢- جهاز إستشعار السرعة "Velocity transducers"

بينما نحن في كثير من الأحيان نحلل بيانات الاهتزاز بوحدات السرعة، ونحن عادة لا نستخدم جهاز إستشعار السرعة فى حد زاتة. ولكنه مازال يستخدم فى الصناعة وسوف نناقش الآن تصميمهاً والإيجابيات والسلبيات الخاصة بها.



جهاز إستشعار السرعة يتكون أساساً من مغناطيس معلق (٦) "suspended magnet" مثبت بين زنبرك (٥) " spring " و المخمد (٣) "damper". ملف (٢) "coil" محيط بالمغناطيس. وفى حالة إهتزاز المجس المغناطيس يبقى ثابت بسبب القصور الذاتى "inertia". وبالتالي يكون هناك حركة المغناطيس داخل الملفات (٢) الذي يولد كهرباء تتناسب مع سرعة الكتلة (٤).



التركيب يشمل ملف (٢) ملتصقة بالكتلة (٤)، ويحيط بها مغناطيس ثابت (٦). والنتيجة هى نفسها حيث تتولد الكهرباء عندما يكون هناك حركة نسبية بين المغناطيس (٦) والملف (٢).

المزايا:

١- لايحتاج مصدر كهرباء خارجى - أنه يولد الكهرباء.

٢- إشارة الخرج قوية.

٣- من السهل إستخدامه وليس حساس لمشاكل التثبيت.

٤- القدرة على العمل فى درجات الحرارة المرتفعة.

العيوب :

١- ليس مناسب لقياس الترددات المنخفضة.

٢- ليست مناسب لقياس الترددات العالية.

٣- حساس لتغير درجات الحرارة.

٤- نظراً لوجود أجزاء متحركة ،فمن الممكن أن يتسبب ذلك فى حدوث تآكل داخلى وبالتالى يقصر عمره.

٥- جهاز إستشعار السرعة كبير الحجم جداً.

التطبيقات:

١- بينما جهاز إستشعار السرعة شائع جداً، فإنها لم تعد مفضلة وسوف نرى أن لاقط الإهتزازات "accelerometer" الذى بداخله تتم عملية التكامل إلى السرعة هو أكثر شيوعاً من مجس السرعة "velocity sensor".

الوحدات:

• الوحدة هى بوصة/ثانية "peak" ومللمتر/ثانية "rms" أو VdB.

٤-٣- أجهزة إستشعار العجلة (لاقط قياس الإهتزازات) "Accelerometers"



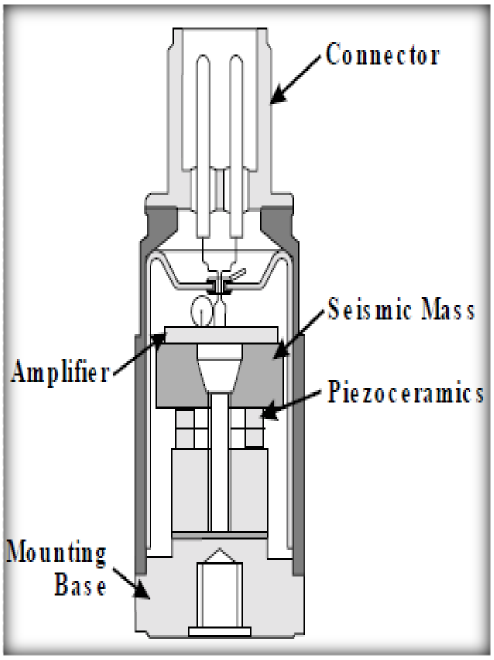
كيفية عمل لاقط البيزواليكترك:-

١- مادة البيزواليكترك (عنصر الإستشعار) توضع أسفل الحمل بإستخدام الكتلة.

٢- حيث أن مادة البيزوإليكترك من الكريستال وموضوعه تحت حمل بإستخدام الكتلة. وكلما إهتز اللاقط تنضغط البلورة (الكريستال) أو تتبسط.

٣- الشحنة الخارجة "charge output" تتناسب مع القوة والعجلة (تبعاً للقانون الثانى لنيوتن القوة تتناسب مع العجلة للكتلة).

٤- تقوم دائرة إلكترونية بتحويل الشحنة الخارجة "charge output" إلى خرج فولت " voltage output".



المميزات:-

١- له مدى من الترددات الواسعة جداً.

٢- له مدى واسع من السعة.

٣- له مدى واسع من درجة الحرارة (١٢٠ درجة مئوية).

٤- إمكانية قياس السرعة أو الإزاحة.

٥- صلب مصمم للأغراض الصناعية.

العيوب:-

١- ليس له إستجابة للصفر هرتز.

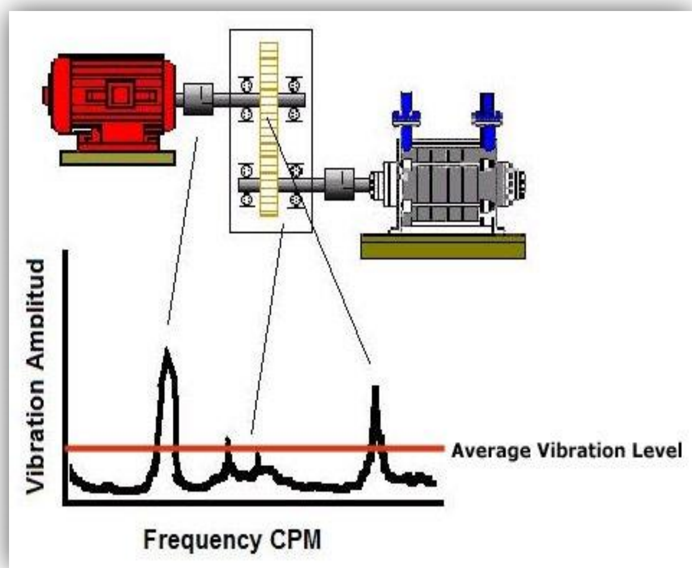
٢- درجة حرارة مكبر الصوت الداخلي لها حدود.

- النهاية -

الباب الخامس

تحليل الإهتزازات

Vibration analysis



أقسام الباب الخامس

١– القسم الأول : العلاقة بين الموجة الجيبية والطيف الترددي
٢– القسم الثانى : الترددات القسرية
٣– القسم الثالث : مراحل تحليل بيانات الإهتزازات
٤– القسم الرابع : مرحلة تحليل/تشخيص المشكلة
٥– القسم الخامس : مرحلة تحليل السبب الجذري للمشكلة

القسم الأول:- العلاقة بين الموجة الجيبية والطيف الترددي

مقدمه:-

تحليل بصمة الإهتزازات تمكننا من فك عقدة الموجة الجيبية وتمثيل مكوناتها الأصلية على رسم تخطيطى يظهر التردد على المحور السينى "X-axis" ومقدار السعة "amplitude" على المحور الرأسى "Y-axis" وهذا يعرف ببصمة الإهتزازات "Vibration spectrum" وهى ذات قيمة كبيرة فى تشخيص وتحليل الأعطال.

حيث يقوم جهاز جامع الإهتزازات "data collector" بتحليل بيانات الإهتزازات وعرضها على المستخدم بالموقع فى صورة طيف الإهتزاز "Vibration spectrum" ومنحنى الزمن " Time waveform" بالإضافة إلى المستوى العام للإهتزازات "Overall Level".

لماذا نريد أن ننظر إلى بيانات الإهتزازات فى صورة طيف الإهتزاز "frequency domain"؟ عندما تتطور المشكلة فى ماكينة من الماكينات الدوارة فإنه يتولد قوة قسرية تتسب فى حدوث الإهتزازات. والمشاكل المختلفة تسبب إهتزاز الماكينة عند ترددات مختلفة. ولتشخيص المشكلة يجب معرفة تردد الإهتزاز. وبالتالى يجب إستدعاء منحنى الزمن "waveform" وطيف الإهتزاز "spectrum".

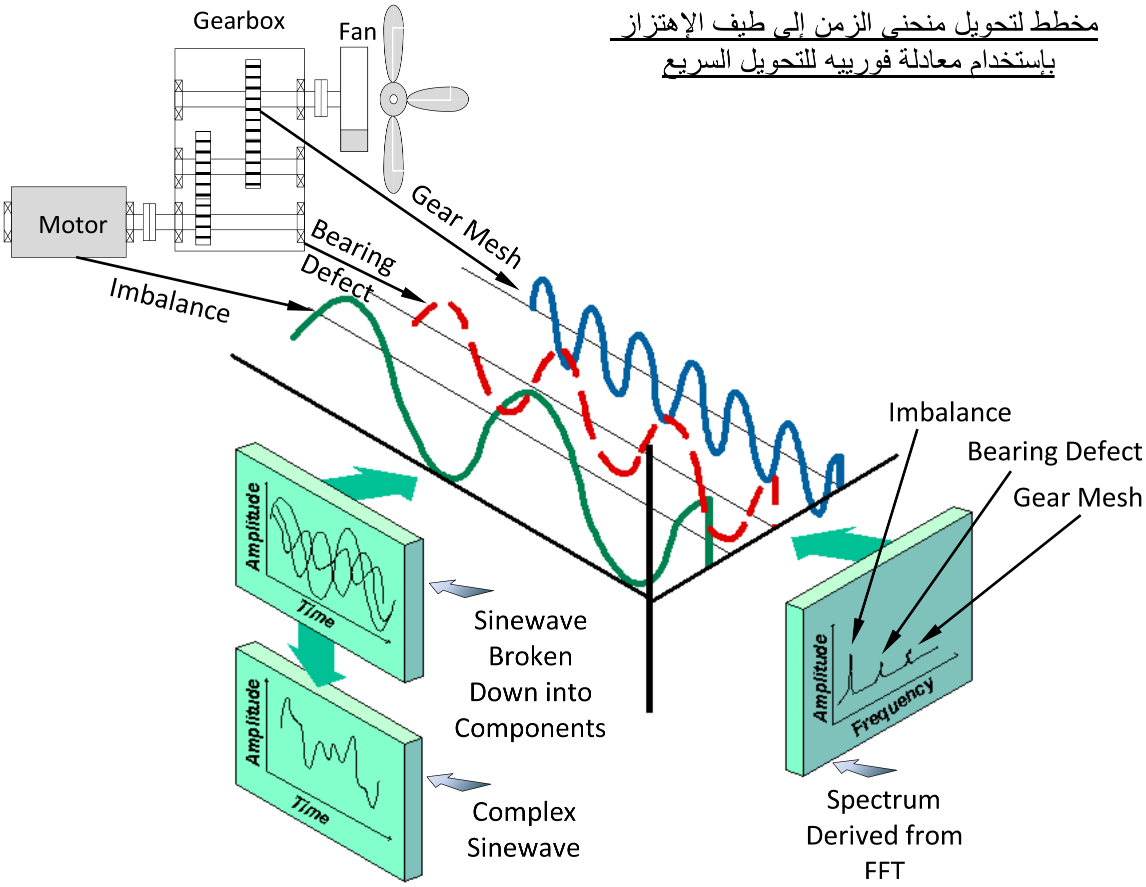
وإذا حاولت تحليل جميع الترددات المختلفة فى منحنى الزمن "time waveform" فإنك تحتاج يوم كامل لفحص نقطة قياس واحدة "one measurement point" وقد يكون مفيداً لمحلل الإهتزازات من ذوى الخبرة لإستخدامه فى تشخيص وتحليل الأعطال ومعرفة قيمة الطاقة الإجمالية لموجة الإهتزاز "total power of the waveform" ولكن فى معظم الأحوال غير مناسبة أو حتى ضرورية.

ولهذا كنا فى حاجة إلى تحويل منحنى الزمن "time waveform" إلى طيف الإهتزاز "spectrum" وبالتالى يتم تحليل الإهتزازات بسهولة ويسر ويقل وقت التحليل.

١- عملية التحوىل من الزمن الى التردد بإستخدام تحويل فورييه السريع

فى الشكل التالى رسم يظهر موتور يتم توجيهه لإنتاج ثلاثة أنواع مختلفة لقوى الإهتزازات وهى عدم الإتزان من عمود الموتور وتعشيق التروس من صندوق التروس ومن رولمان بللى الموتور. وبوضع لاقط الإهتزاز عند أى نقطة على الموتور سوف يقيس موجة إهتزاز معقدة " complex waveform" وتمثل محصلة جميع الإهتزازات الموجودة على الماكينة. ويمكن تفكيك هذه الموجة الجيبية المعقدة أو إرجاعها إلى مركباتها الأصلية إلى عدد من المنحنيات الجيبية النقية متوافقة مع الترددات ذات العلاقة كما هو مبين على يسار الرسم.

مخطط لتحويل منحنى الزمن إلى طيف الإهتزاز
بإستخدام معادلة فورييه للتحويل السريع



الأسلوب الذي وضع به الرسم البيانى يوضح أن العملية هى بمثابة البحث في الإهتزاز من إتجاهين هو إتجاه منحنى الزمن وهو على الجانب الأيسر من الرسم البيانى وإتجاه منحنى التردد وهو على الجانب الأيمن من الرسم البيانى والنظر إليهما بزاوية قائمة مع بعضها البعض.

وبالنظر من إتجاه منحنى الزمن "time-direction" نرى الجمع الجبرى لجميع الترددات الفردية الموجودة وتمثلها الموجات الجيبية (اللون الأخضر و الأحمر والزيتى). ومن إتجاه منحنى التردد "spectrum-direction" نرى موقع "location" وسعة كل عناصر التردد وهى تردد عدم الإتزان وتردد رولمان البللى وتردد تعشيق التروس.

وهذا الرسم البيانى يوضح لنا عملية التحويل من الزمن الى التردد والتى تتحقق بإستخدام معادلة خوارزمية تسمى تحويل فورييه السريع والمعروف (known as an FFT) "Fast Fourier Transform".

سنة (١٧٦٨-١٨٣٠) إقترح البارون جوزيف فورييه جان بابتيست فكره بأن حركة النظام فى حالة الإتزان تكون بموجة جيبية معقدة يمكن تمثيلها كما لو كانت مجموع موجات كثيرة جيبية مختلفة فى التردد والسعة.

ومعادلة فوريية للتحويل السريع يستخدم خوارزمية رياضية طويلة للتحويل من مجال الزمن " time waveform" مهما كان معقداً إلى مجال التردد "spectrum" وهى ترددات فردية وسعات موجبة كما بالشكل.

٢- الإشارات "Signals"

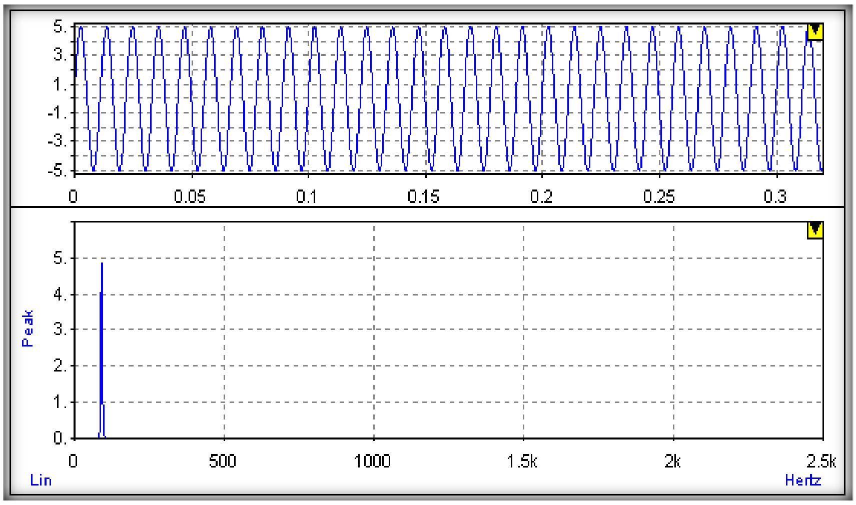
وتسمى عملية التحول من "Time domain" إلى "Frequency domain" بعملية التحليل الترددى "Frequency analysis" وتتميز هذه العملية بأنها تفك الشفرة المعقدة الغير مفهومة إلى شفرة مفهومة يمكن فهمها والتعامل معها وفى الماضى كان هذا التحليل يتم رياضياً بواسطة الإنسان ولكنها أصبحت الآن سهلة بعد إستخدام الحواسب الآلية.

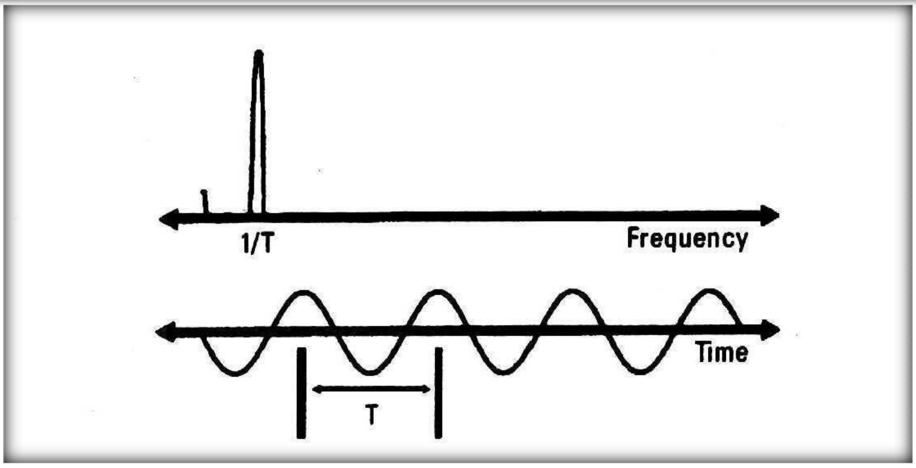
٢-١- الموجة الجيبية "Sine wave"

فإننا سوف نلقى نظرة على بعض الإشارات التقليدية "الكلاسيك"، بدءاً من الموجة الجيبية النقية (٥٠ هرتز). ونلاحظ أنه كلما زاد التردد تتقارب دورات الموجة "cycles" (السيكل). إذا حركت الفأرة فوق الرسم البيانى تحصل على قراءات كل من التردد والسعة. وإذا أشرت إلى القمة "peak" فى بصمة الإهتزازات ستجد نفس التردد وهو X١ وهو التردد الأساسى.

وإذا قمنا بزيادة التردد من (٥٠ إلى ١٥٠ هرتز) فإن الموجات تتقارب جنباً إلى جنب وقمة البصمة تتحرك إلى اليمين مما يدل على زيادة التردد.

أى أن مصدر الاهتزاز عبارة عن موجة جيبية كبيرة نقية "sinusoidal" وبالتالى تكون عملية التحويل من نطاق الزمن "Time domain" إلى نطاق التردد "frequency domain" عبارة عن تردد واحد "single frequency" ويظهران على النحو التالى. وهذا النوع من إشارة التردد إحدى الصفات المميزة لعدم الإتزان أو إنحناء الأعمدة حيث أن القوة المسببة للإهتزاز مرتبطة ببساطة بمقدار سرعة الدوران للعمود "shaft".



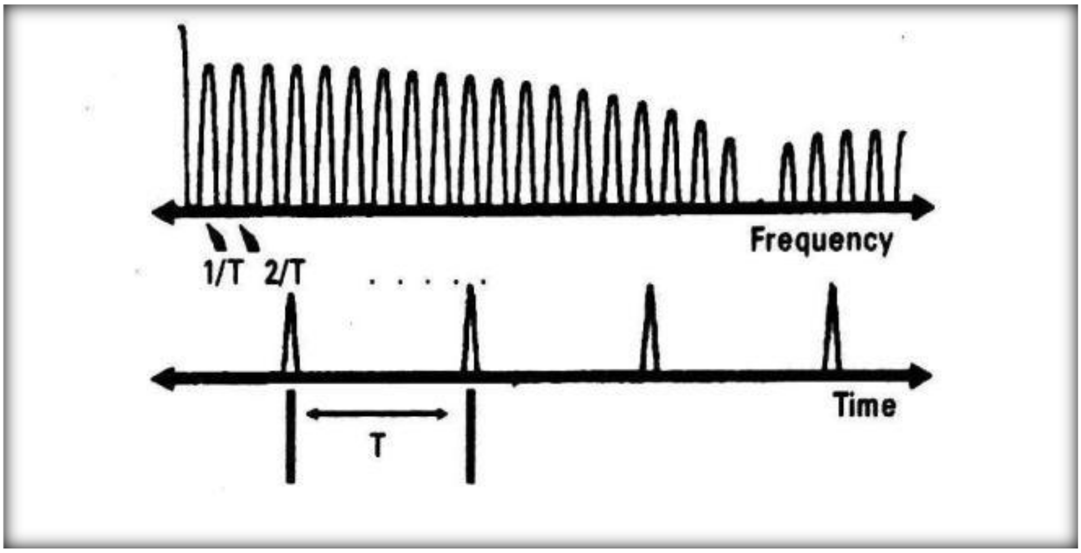


٢-٢- الصدمات "impacts"

والصدمات عبارة عن طاقة عالية جداً فى زمن قليل جداً وتظهر وتختفى كما هو واضح فى " Time domain". وتعتبر عكس الإشارة السابقة والخاصة بالتردد الواحد المهيمن لأنه إلى حد ما تعتبر جميع الترددات موجودة. وقد يكون هناك إختلافات كثيرة فى بعض خصائص كل تردد من هذه الترددات.

والصدمات الجيدة "perfect" سوف تولد طاقة عبر بصمة الطيف "spectrum" كما فى الرسم البيانى الأول التالى.

وهذا هو المبدأ المطبق فى إختبار الصدمة "bump test" المستخدم لعمل إثارة "excite" وتحديد الرنين فى الماكينات والهياكل "structural".



فى الماكينات عادةً ما تكون الصدمات "impacts" المتكررة والدورية ناشئة عن التفككات الميكانيكية "looseness" أو كسر أسنان التروس "broken gear tooth" وفى هذه الحالة تكون بصمة المعدة غنية بالتوافقيات المتباعدة "harmonics" عند الترددات المتكررة كما فى الرسم البيانى الثانى السابق.

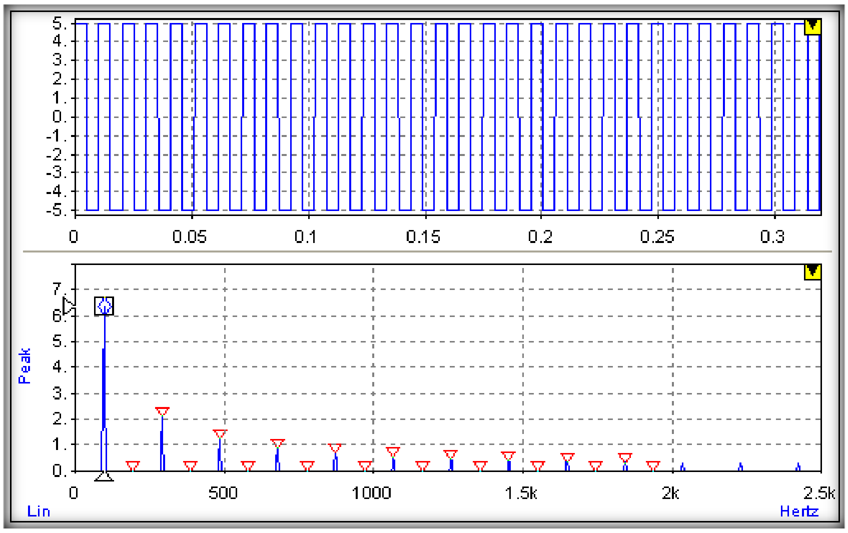
الخلوصات الزائدة فى كراسى السبائك "sleeve) journal)" يمكن أن ينتج عنها أيضاً توافقات عند (X٠.٥) كما هو مبين أدناه. وتسمى توافقات النصف أوردر "half order" أو الترددات الفرعية من سرعة الدوران "Sub-synchronous" أى الترددات الأقل من سرعة الدوران "1order". وهى يمكن أن تنتج من الإحتكاك أو من الصدمات الشديدة "severe impacting". ومن الممكن ظهور توافقات من الثلث أوردر "1/3 order".

٢-٣- الموجة المربعة والتوافقات "Square wave and harmonics"

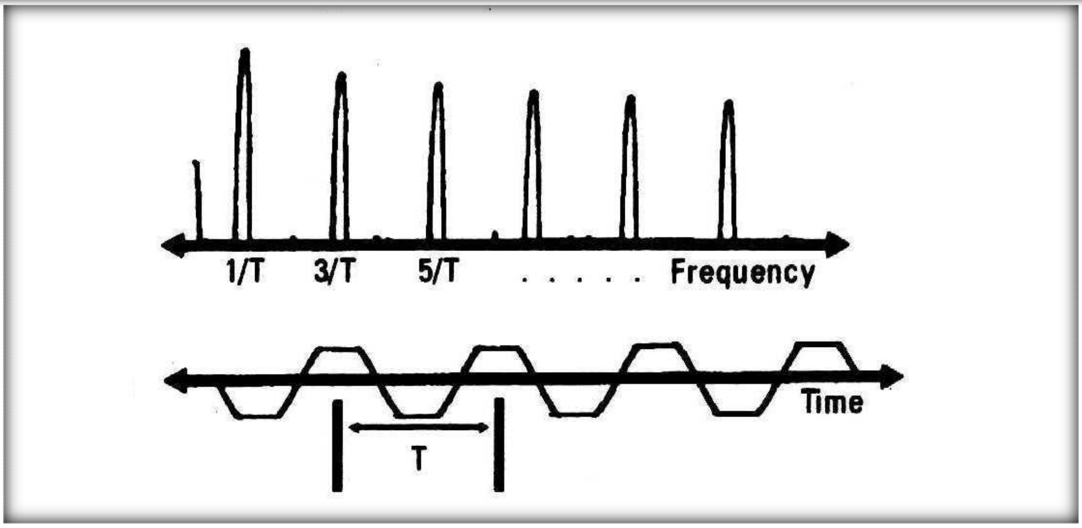
عند تغيير خرج الجهاز من الموجة الجيبية إلى الموجة المربعة (١٠٠ هرتز). سنرى أن شكل الموجة تغيرت وتحولت البصمة فجأةً إلى العديد من القمم. أى أن البصمة تغيرت بدرجة كبيرة وبتحريك المؤشر على البصمة (الرسم البيانى) سترى القمم عند (X٣، X٥، X٧، وهلم جرا). أى مضاعفات فردية للتردد الأساسى وهو سرعة الدوران. ويطلق على سلسلة القمم التى هى مضاعفات عدد صحيح من التردد بالتوافقات "harmonics".

فى هذا المثال يمكننا أن نرى توافقات الأعداد الفردية "odd number" الناتجة من الموجة المربعة "square wave" وسوف ترى ذلك فى بعض الأحيان فى تحليل إهتزازات الماكينات، وعلى سبيل المثال عند حدوث تفكك بالماكينة.

وفى الواقع عادةً لا ترى موجة مربعة نقية. وسوف ترى إشارات عابرة "transients" عند حدوث صدمات "impact"، ولا تقتصر حركة الماكينة على الصعود والهبوط فقط وبالتالى سوف تتغير شكل الموجة وبصمة الإهتزازات ستشتمل على توافقات لجميع المضاعفات الفردية والزوجية.



وتقع الموجة المربعة في مكان ما بين الموجة الجيبية "sine wave" والصدمات المتكررة "repetitive impact" وشكل بصمة الإهتزازت عبارة عن توافقات فردية "odd orders" مع سرعة الدوران مع تناقص فى السعة كما بالشكل.

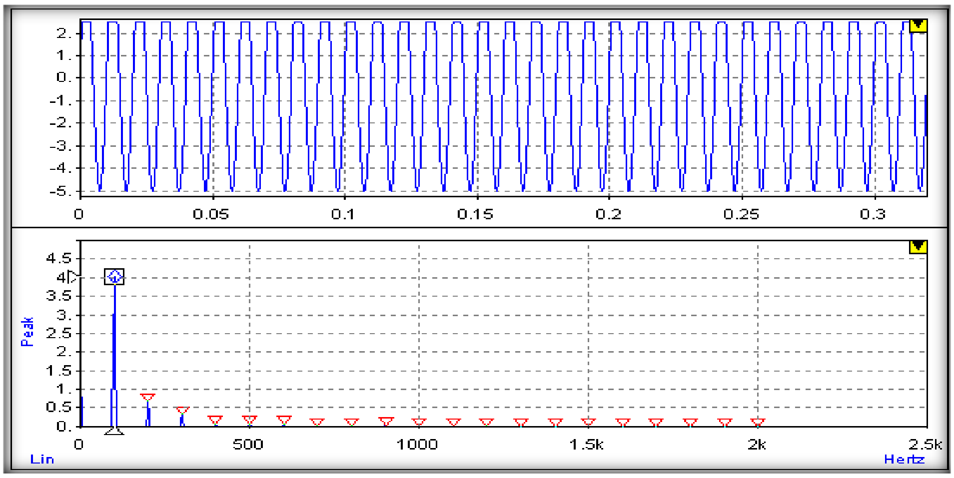


وهذا النمط أو الشكل "pattern" يمثل فى بعض الحالات عدم المحورية "misalignment" والتفككات الميكانيكية "looseness" وسوف تكون واضحة جداً فى "time domain".

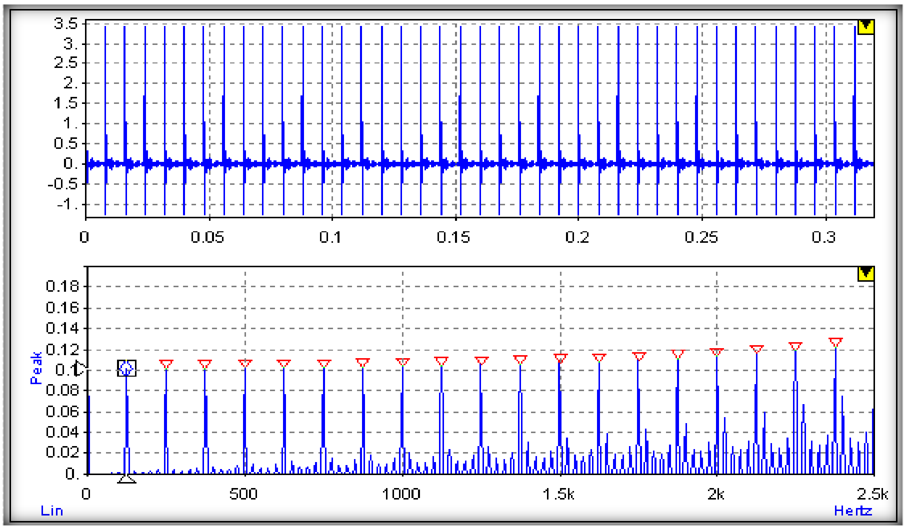
٢-٤ الموجة المقصوصة "Clipped wave"

دعونا ننظر إلى تلك الخاصية "phenomenon" عن قرب فإذا إخترنا الموجة المقصوصة وهى عبارة عن موجة جيبية ذات قمم مقطوعة من أعلى "tops lopped off" كما بالشكل. هذا الشكل المتوقع لحركة العمود أو البللى عندما نقيد الحركة فى إتجاه واحد فقط. ويمكننا أن نرى وجود توافقات قوية "strong harmonics".

وفى هذه المرة لدينا كل التوافقات وليس فقط التوافقات الفردية. ولدينا أيضاً توافقات قوية "stronger harmonics" (سعة عالية نسبة إلى التردد الأساسى) إذا وجد أكثر من موجة مقصوصة "clipped" أو إذا كان هناك إشارات عابرة "transient" نتيجة للصدمات "impact".



٢-٥- الأحداث اللحظية العابرة "Transients"



إذا قمنا بإختيار الأحداث العابرة "Transients" الشكل الموجى والبصمة سوف تتغير بطريقة غير عادية وإذا قمت بتحريك مؤشر الفأرة على القمم سوف ترى أن لدينا فى الواقع قمم عند (X٠.٥، X١ ، X١.٥، X٢، وهلم جرا).

لدينا توافقات عند نصف مضاعفات السرعة "half-order"

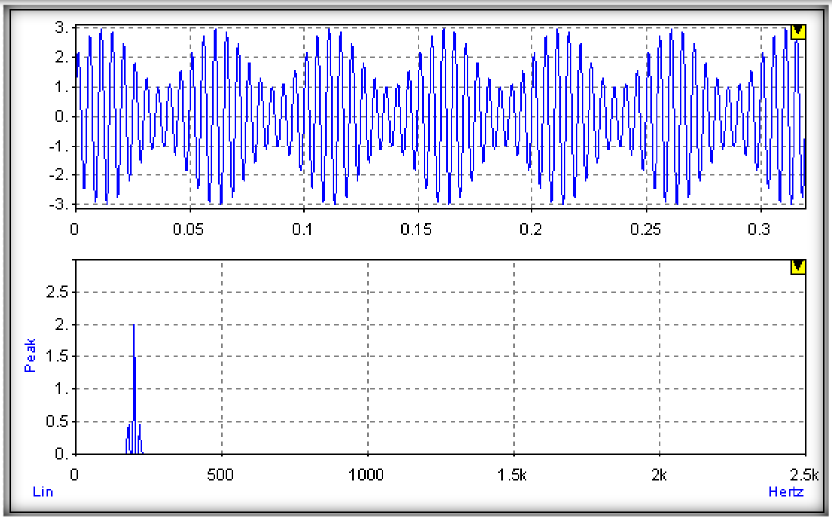
حاد فى الماكينة وبدلاً من وجود توافقات عن سرعة الدوران X١ تكون التوافقات عند X٠.٥.

٢-٦- التشكيل والترددات الجانبية "Modulation and sidebands"

التشكيل "Modulation" هى ظاهرة شائعة جداً في تحليل الإهتزازات للماكينات الدوارة. لو نظرنا لمفتاح الراديو سوف تجد السعة المعدلة AM "Amplitude Modulation" والتردد المعدل FM "Frequency Modulation". ولكننا سوف نركز إهتمامنا على السعة المعدلة AM.

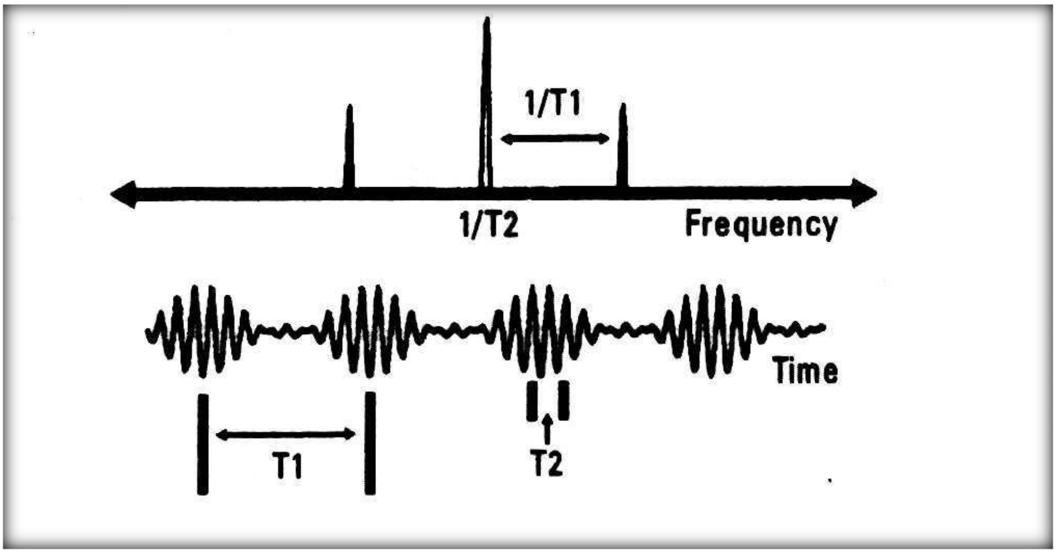
لكى نتمكن من إرسال إشارات الراديو عبر مسافات طويلة والتمييز بين كل محطة عن الأخرى فمن الضرورى إستخدام الترددات العالية فى النقل (من ٥٠٠ إلى ١٧٠٠ KHZ) وهذا يسمى الناقل "carrier". الموسيقى وأصوات (الدى جى) تكون إشارة محمولة "superimposed" أو مشكلة "modulated" على التردد الحامل "carrier". وعندما تصل الإشارة إلى الراديو يتم إزالة الناقل وهذه العملية تسمى إعادة التشكيل "demodulated" ويترك التردد المنخفض للموسيقى والكلام. وعلى أي حال يكفى هذا القدر عن محطات الراديو.

وإذا ألقينا نظرة أخرى على الإشارة المحمولة "modulated signal"، يمكننا أن نرى سعة الترددات العالية تتغير مع الزمن بشكل دورى.

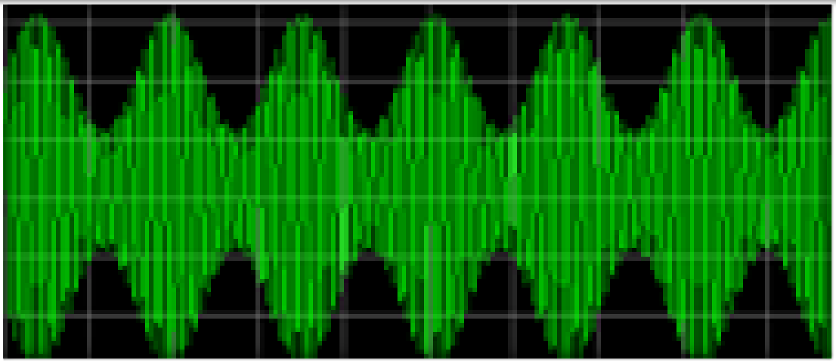


أى أن التشكيل أو النمزجة "Modulation" عبارة عن تردد واحد مفرد والمعروف بالتردد الحامل "carrier frequency" ويكون محاط على جانبية " modulated in amplitude " بتردد آخر أقل "lower frequency".على سبيل المثال قد يكون إنحناء العمود فى صندوق التروس يسبب ظهور تردد تعشيق التروس "gear mesh frequency" ومحاط على جانبية "amplitude modulated" بسرعة دوران العمود "shaft".

وينظر إلى التردد الناقل بإعتباره موجة جيبية وعند تحويلها تكون بتردد مفرد " single spectrum component" لكنه له مركبة "component" على يمينه وعلى يساره تسمى "Sidebands" وتعتبر ذلك أداة قوية جداً لتشخيص وتحليل مشاكل تعشيق التروس.



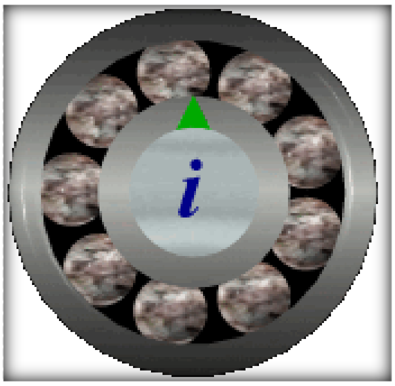
ونلاحظ أن سعة إشارة التردد العالى تأخذ فى الإزدياد ثم تتناقص وتزداد وهلم جرا وهذا يمكن أن يحدث داخل الماكينات الدوارة.



دعونا ننظر إلى مثال تقليدى للتشكيل أو النمزجة "modulated" حيث يوجد شظية "spall" على الجلبة الداخلية لرولمان البللى.



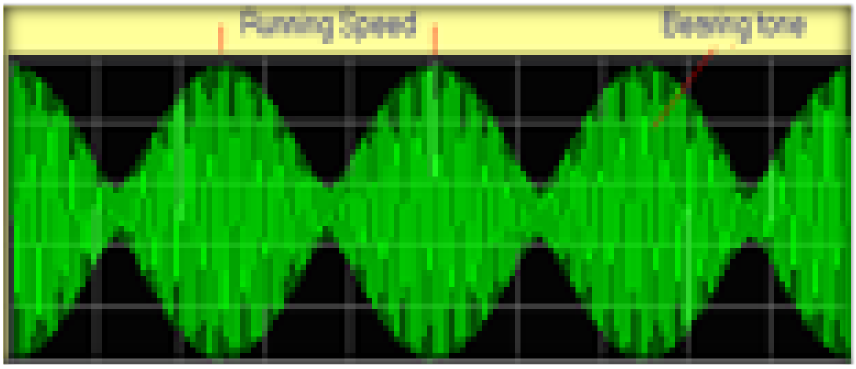
كلما دار العمود يأتى ويحتك مع كل كرة من كرات رولمان البللى. الكرة تخبط فى الشظية تسبب عابرلحظى "transient" (وبالتالى يمكن أن يحدث توافقات). عدد مرات خبط "strikes" الكرة لكل لفة يعتمد على الخصائص الهندسية "geometry" لرولمان البللى.



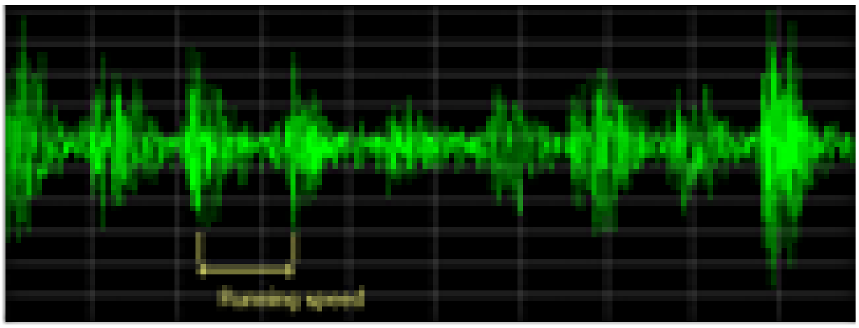
وعندما تكون الشظية فى منطقة الحمل "load zone" لرولمان البللى، فإنها تخبط الكورة بصلابة مما كانت عليه خارج منطقة الحمل. والصدمات "impact" تقل عندما تكون الشظية على قمة العمود "top of the shaft"، وتكبر فى الجزء السفلى "the bottom" وخلاف ذلك بينهما.

ما تأثير ذلك على شكل الإهتزازات "vibration pattern"؟ إذا كانت الصدمات بقوة أكبر فى منطقة الحمل، فمن الممكن أن تتوقع أن مستوى الإهتزازات سيكون كبيراً. ومعنى ذلك أن مستوى الإهتزازات سوف يتغير مع دوران العمود.

الصدمات "impact" هو التردد الناقل أو الحامل "carrier frequency"، ويحدث التشكيل "modulated" بالحركة داخل وخارج منطقة الحمل، والتى تحدث مرة كل لفة من سرعة التشغيل.

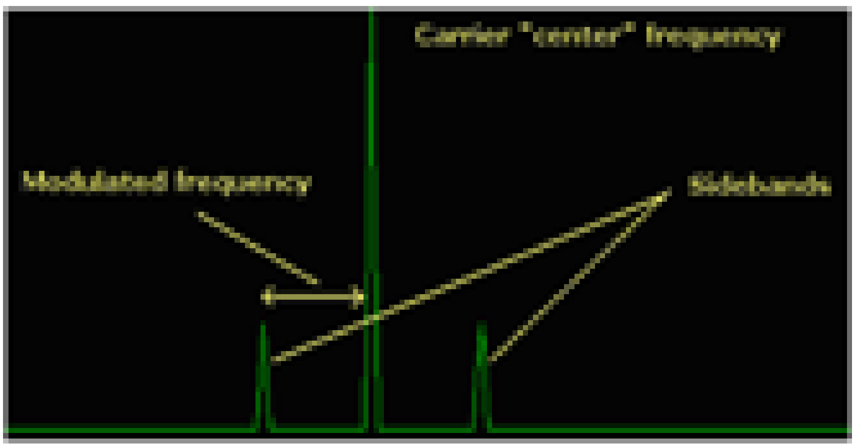


هنا مثال فعلى لإشارة التشكيل أو النمزجة "modulated" من الماكينة. يمكننا أن نرى بوضوح إشارة التردد العالى والتى تمثل تردد الصدمات "impact" والتردد المنخفض يمثل التشكيل أو النمزجة "lower frequency modulation"

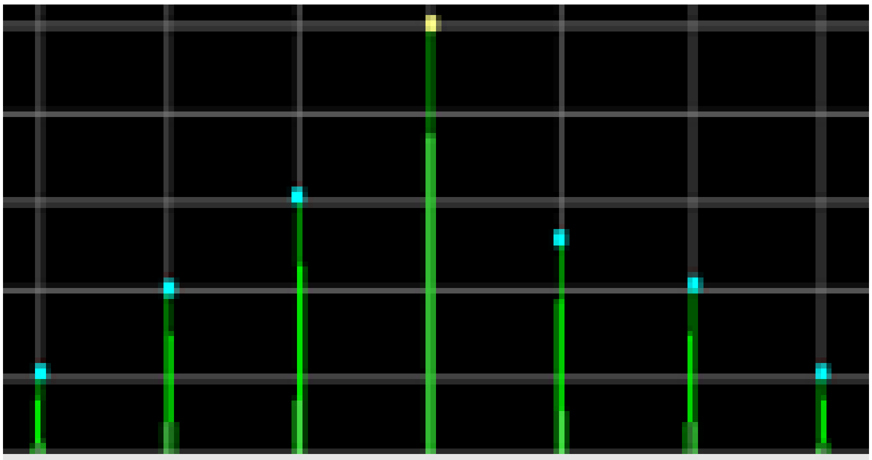


إذا ألقينا نظرة فاحصة على البصمة فإننا نرى قمة كبيرة عند التردد الحامل "carrier frequency" ومحاطة بقمم صغيرة.

وفى هذا المثال هناك قمة واحدة على كل جانب ولكننا سوف نجد عادة أكثر من ذلك بكثير.



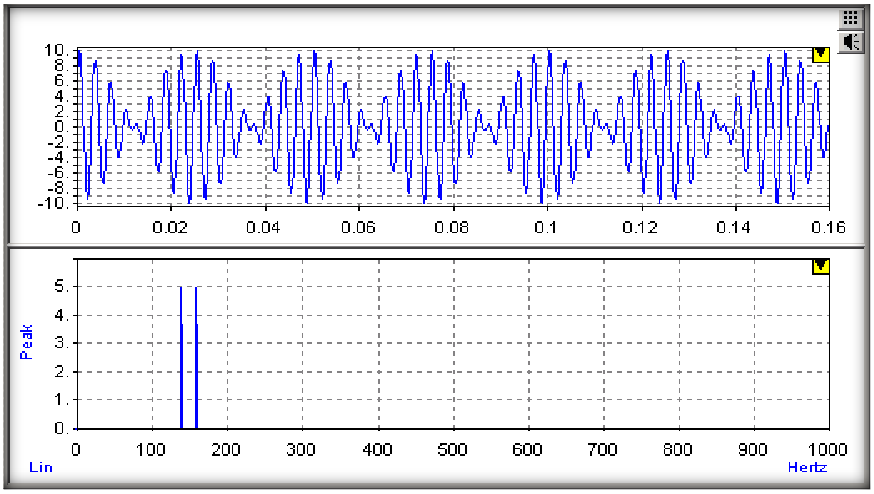
وإذا كان لنا أن نحلل البصمة ونرى مثل هذا الوضع. فإننا نحاول معرفة تردد كل من التردد الذى فى الوسط (المركز) وهو التردد الناقل "carrier" والتردد الجانبى "sideband" وهو تردد التشكيل أو النمزجة "modulated". وكما سنرى فى تحليل الإهتزازات يمكننا أن نشخص مشاكل البللى ومشاكل صندوق التروس، والمشاكل الكهربية وغيرها.



٢–٧– تردد الخفقان "Beat frequencies"

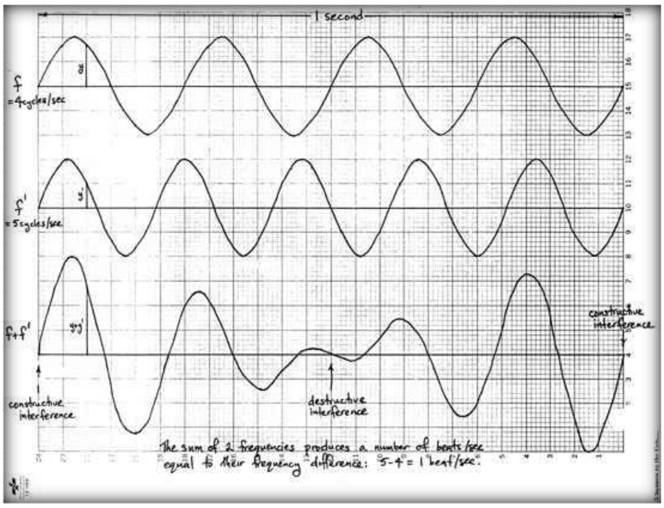
وهى ظاهرة مثيرة للإهتمام ومشتركة فى تحليل الإهتزازات. إذا سبق لك وركبت طائرة بمحركين عندما يكون سرعة المحركين مختلفة قليلاً عن بعضهم البعض، يمكنك سماع خفقان الترددات المنخفضة أو "beating sound".

هذه الظاهرة دائماً تحدث عندما يكون لديك إشارتين قريبتان فى التردد إحدهما للآخر. وهذا يحدث عند تشغيل مكينتان تقعان جنباً إلى جنب (side-by-side) بسرعة متماثلة، أو عندما يكون الترددان المهيمنان لهما قريبان من بعضهما البعض وسوف تسمع صوت الخفقان "beating sound".



تأثير الخفقان "beating effect"

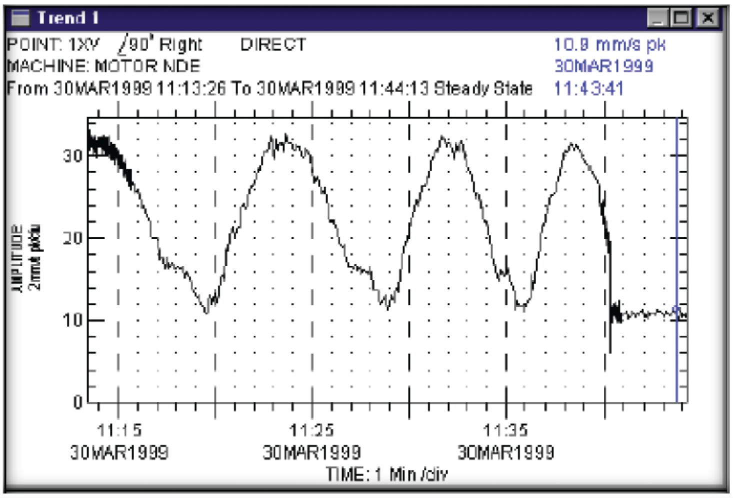
يحدث الخفقان عند وجود مصدرين لقوى الإثارة الديناميكية "dynamic excitation" قريبان جداً فى التردد من بعضهما البعض والمسار يسمح لهما للإنتقال إلى بعضهما البعض. ولأن الترددات قريبة جداً من بعضها البعض حيث أن الشكل الموجى "waveforms" يعزز بعضه البعض بالتبادل فى بعض الأوقات ويلغى بعضه البعض فى أوقات أخرى. خلال الأوقات التى فيها موجات الإهتزازات تعزز بعضها البعض تزداد الإهتزازات وفى أوقات إلغاء بعضها البعض الإهتزازات تقل.



مثال:- طلمبتان كما بالشكل وتقعان جنباً إلى جنب وتعملان عند نفس سرعة الدوران تقريباً. عدم الإتزان المتبقى فى الطلمبات يؤدى إلى زيادة قوى الإثارة إلى حد كبير. أيضاً الأنابيب سهلت مسار للإنتقال الميكانيكى للإهتزازات من كل طلمبة لتؤثر على الأخرى.

والشكل الآتى يبين منحنى الطور عندما يتم تشغيل كل الطلمبات فى وقت واحد. لاحظ عند نهاية المنحنى، عندما توقفت إحدى الطلمبات عن العمل تأثير الخفقان "beating effect" قد توقف وبناءً على ذلك أصبحت الإهتزازات مستقرة وأصبح منحنى الإطراد مستقراً.





٢-٨- الإشارات المتزامنة و المتوافقة "Synchronous and Harmonics Component"

الأنواع المختلفة من الإشارات يتم تحليلها إلى عواملها الأولية وتحويلها من "Time domain" إلى "Frequency domain". و كثير من الإشارات الغير موجيه "Non-Sinesoidal" يمكن فصلها إلى عدد من الترددات المتزامنة أو المتوافقة معها.

تعريفات:-

- "Synchronus Component" هى الترددات المتزامنة مع سرعة دوران الماكينة ويطلق عليها أيضاً "Order".
- "Order" أو "Synchronus" هى الترددات المتزامنة مع سرعة دوران الماكينة.
- "Harmonics Component" هى الترددات المتوافقة مع أى تردد من ترددات الماكينة بما فيها سرعة دوران الماكينة.
- يقال أن جميع إشارات "Order" أو "Synchronus" إشارات "Harmonics" وليس كل إشارات "Harmonics" إشارات "Order".

مثال:-

إحدى ترددات رولمان البللى قيمتها ٢٠ هرتز وسرعة دوران الماكينة ٥ هرتز فيقال فى هذه الحالة أن مضاعفات تردد رولمان البللى (٢٠ هرتز) تسمى توافقات "Harmonics" أما مضاعفات سرعة الدوران (٢٠ هرتز) فتسمى "Order" أو "Synchronus".

القسم الثانى:- الترددات القسرية "Forcing frequencies"

مقدمه:-

رأينا أن الأشكال والأنماط "patterns" الموجودة فى كل من الشكل الموجى "waveform" وبصمة الإهتزازات "spectrum" تعتمد على الأجزاء الدوارة "rotating elements" الموجودة فى الماكينة. ومن السهل جداً على سبيل المثال دراسة إهتزازات المروحة وتحديد أماكن ظهور القمم "peaks" بالبصمة وهذا لا يعني أنها تظهر بالضرورة ولكنها تظهر فقط عندما يكون هناك مشكلة أوعطل.

وبالنظر فى أنواع الماكينات الموجودة بالصناعة، يمكننا أن نرى أن عدد الترددات التى يمكن أن نتوقعها فى بصمة الإهتزازات كثيرة.

١- الترددات القسرية "Forcing frequencies"

يجب أن نتعلم كيفية دراسة الماكينة وحساب تلك الترددات – وهذه الترددات تعرف بإسم الترددات القسرية "Forcing frequencies" أوالترددات الخطأ "fault frequencies". ولسوف نبدأ الآن فى حساب تلك الترددات.

وتوجد عدة مصادر لدوال القوة والتى تحدث الترددات القسرية منها:-

١- القوة المتولدة داخلياً "Internally generated forces".

٢- عدم الإتزان الديناميكى للجزء الدوار.

٣-

٤- عدم إستقامة محور دوران عمود المحرك مع المعدة التى يديرها.

٥- إنحناء العمود.

٦- تفكك مسامير القواعد.

٧- تآكل أو إنهيار وصلة الحركة "Coupling".

٨- تزييت زائد أو تزييت قليل.

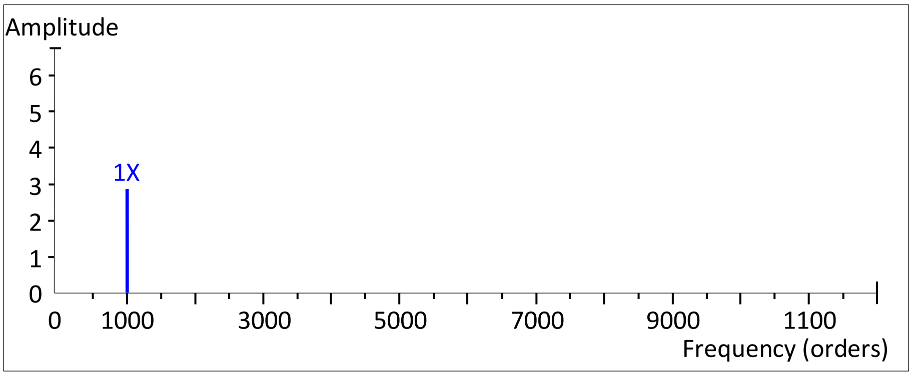
٩- ترحيل مركز دوران الجزء الدوار (تروس – روتر - إلخ).

١٠- الأحمال الخارجية أو الزائدة "External loads".

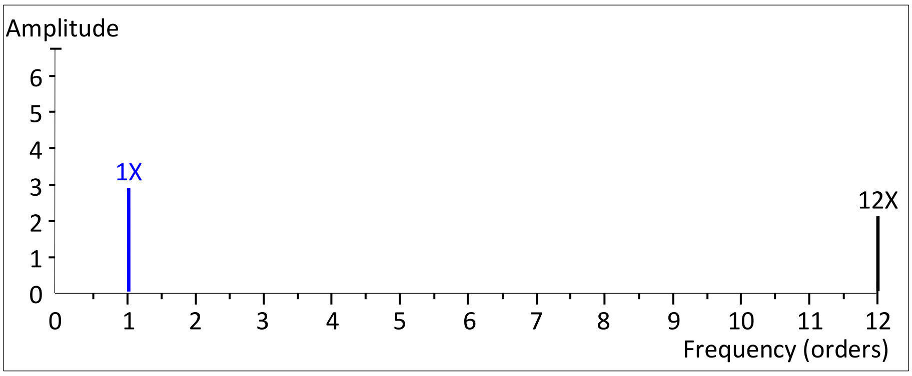
١١- الإثارة الناتجة من البيئة المحيطة "Ambient excitation".

١-١- حساب الترددات القسرية "Calculating forcing frequencies"

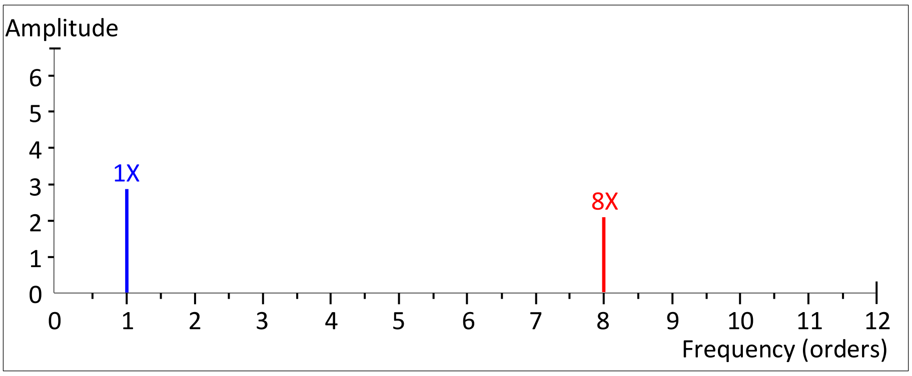
إذا كان هناك عمود يدور "rotating shaft" لموتور على سبيل المثال. سوف نتوقع تردد ينتج عند سرعة الدوران. وإذا دار الموتور بسرعة ١٠٠٠ سيكل لكل دقيقة "CPM" فإننا سوف نتوقع الذروة أو القمة فى بصمة المعدة عند ١٠٠٠ "CPM".



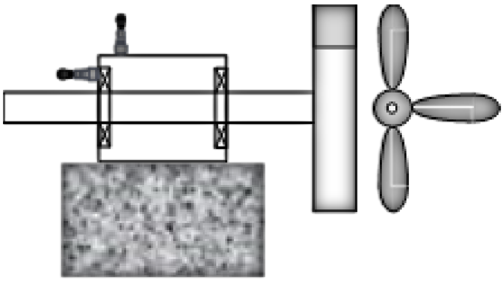
ولقد تعلمنا وصف الترددات بمضاعفات سرعة التشغيل "orders" وبالتالى سيكون تردد سرعة الدوران (X١)



وإذا نظرنا إلى مروحة التبريد للمحرك وجدنا أنها تتكون من ٨ ريش "blades" وسوف تظهر فى بصمة الإهتزازات إذا حدث بها تآكل "wear" أوحدث أى نوع من مشاكل التدفق "flow". والتردد المرتبط بمروحة التبريد يظهر عند X٨ أو (٨٠٠٠ CPM)



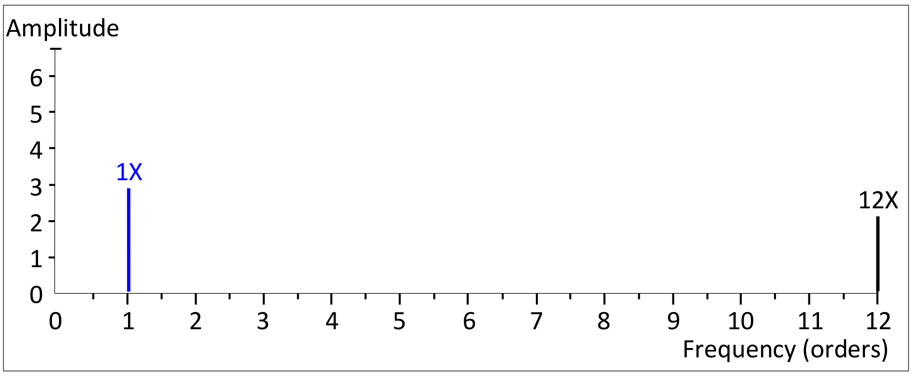
والخطوة التالية سوف نضيف ريشة الضاغط إلى الموتور



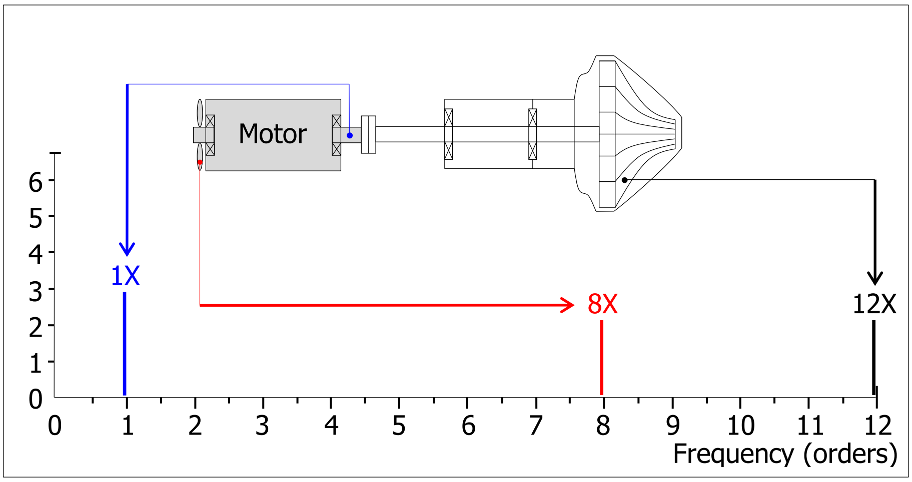
يمكننا الآن أن نرى رولمان البللى فى الماكينة والكوبلنج والحدافة "impeller". وسوف يتم حساب الترددات القسرية لتلك الماكينة – ثم بعد ذلك سنجعل تلك الماكينة أكثر تعقيداً.

أولاً ننظر إلى الضاغط وسرعة دوران الحدافة أو الريش على الحدافة. وسوف نحسب تردد الريش بنفس طريقة الحساب التى تمت لريش المروحة على الموتور.

إذا كان لدينا ١٢ ريشة، فكيف يتم حساب التردد، وفى هذه الحالة يتم حساب التردد بضرب عدد الريش فى سرعة عمود الدوران. وفى مثالنا نجد أن عمود الضاغط يقاد بالموتور مباشرةً "directly driven". وبالتالى يدور بنفس سرعة الموتور (X١ أو ١٠٠٠ CPM).



وإذا نظرنا إلى كل الماكينة وجدنا ثلاث ترددات هى الموتور، سرعة عمود الضاغط، سرعة ريش مروحة التبريد وسرعة ريش حدافة الضاغط.



تذكر أن الحدافة "impeller" تدور عند X١، حيث أنها متصلة مباشرة بعمود الموتور وعند كل لفة للعمود سوف ترى ١٢ ريشة "vanes". وإذا وجد أى مشاكل "fault condition" تخص تلك الريش، سوف ترى قمة "peak" فى بصمة الإهتزازات عند X١٢. وإذا كانت الحدافة "impeller" بها عدم إتزان "out of balance" سوف ترى قمة "peak" عند X١ أى عند سرعة دوران الحدافة "impeller". وسوف نناقش تلك الأعطال فى وقت لاحق، ولكننا الآن نحتاج إلى فهم تلك الترددات المعنية "understand the frequencies".

نحن بحاجة إلى أن نتذكر أنه يمكننا حساب الترددات بمضاعفات السرعة "orders". عندما ندرس البصمة، أو عند إعداد جهاز جامع الإهتزازات "data collector" ليساعدنا فى تحليل الإهتزازات لتلك الماكينة، ومعرفة التردد الفعلى.

مثال:-

وإذا كانت سرعة دوران الماكينة ١٠٠٠ CPM، ما هو تردد كل من ريش مروحة الموتور " blade pass" وريش حدافة الضاغط "vane pass"؟ وهذا ليس صعباً هما ٨٠٠٠ CPM و ١٢٠٠ CPM على التوالى.

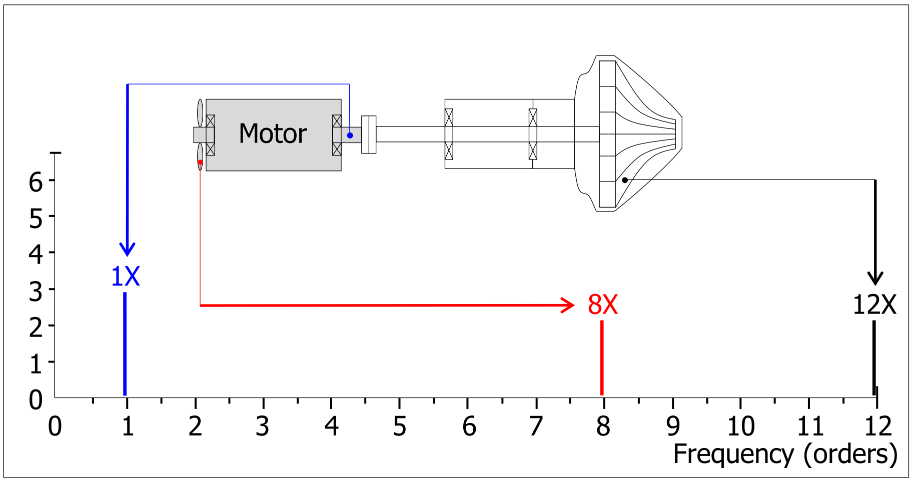
١-١-١- مراجعة على الترددات القسرية

الخطوات التى يجب إتخاذها لحساب الترددات القسرية "forcing frequencies" كالآتى:-

١- تحديد السرعة النسبية لكل عمود "shaft".

٢- إنظر إلى الأجزاء على كل عمود ثم إحسب الترددات القسرية لكل جزء (رولمان البللى، الريش، تعشيق التروس وهكذا) فقط تأكد من أنك أخذت سرعة العمود فى الإعتبار. وسوف نتعلم المزيد من الترددات القسرية فى الأقسام اللاحقة.

الترددات القسرية تستخدم لمساعدتنا فى تشخيص الأعطال للماكينات الدوارة. هذه الحسابات تساعدنا على التعرف على أماكن القمم "peaks" فى البصمة.



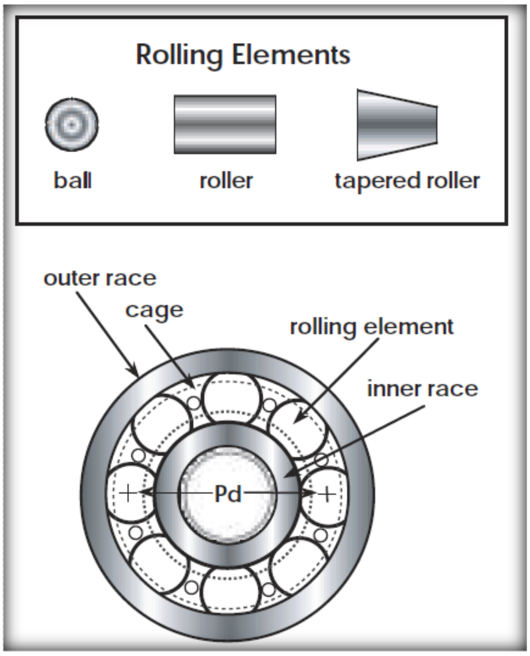
لقد إستخدمنا مروحة على الموتور وحدافة "impeller" على الكومبروسور كما فى المثال لإظهار كيف يتم حساب الترددات. وهناك عدد كبير من الماكينات التى لها أجزاء دوارة مثل المراوح، البلور "blowers"، الطلمبات، التربينات، الخلاطات "mixers"، الكسارات "crushers" وغيرها الكثير.

فى حين أننا لاننافش طبيعة العطل هنا، ولكننا سنراجع على كيفية حساب الترددات القسرية. ويتم حساب التردد القسرى وذلك بضرب سرعة العمود فى عدد العناصر "number of elements".

على سبيل المثال، إذا كانت المروحة لها ٦ ريش، التردد القسرى يكون ٦ فى سرعة المروحة. وإذا كانت الطلمبة لها ٨ ريش، التردد القسرى يساوى ٨ فى سرعة الدوران.

١–٢– حساب الترددات القسرية لرولمان البللى "Forcing frequency"

تحدث إنهيارات أو عيوب رولمان البللى نتيجة الإجهادات "fatigue"، التآكل "wear"، رداءة التركيب "poor installation"، تزييت غير مناسب "improper lubrication" وأحياناً أخطاء فى تصنيع أجزائه كما هو مبين بالشكل.



الشكل يبين مكونات "Components" رولمان البللى

عندما يدور البللى، ويحدث عدم إنتظام فى أسطح المجارى "raceway" أوعدم إستدارة العناصر المتدحرجة يثير ذلك الترددات الأساسية لرولمان البلى "fundamental defect frequencies" ويبدأ الإنهيار. وهناك أربعة ترددات لرولمان البللى تشمل أجزائه ومكوناته كما يلى:–

"FTF" وهى ترددات القفص "cage" "Fundamental Train Frequency".

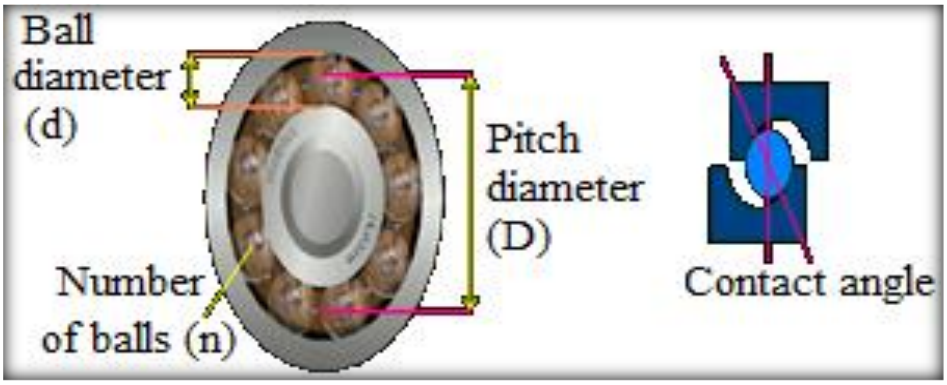
"BSF" وهى ترددات العناصر المتدحرجة "Ball Spin Frequency".

"BPFO" وهى تردد الجلبة الخارجية "Ball Pass Frequency of the Outer race" وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الخارجية.

"BPFI" وهى تردد الجلبة الداخلية "Ball Pass Frequency of the Inner race" وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الداخلية.

وللراغبين فى حساب ترددات عيوب رولمان البللى، أنظر إلى المعادلات الآتية والتى تعتمد فى حسابها على سرعة دوران العمود "shaft speed" وعلى هندسة رولمان البللى "geometry" وهى معلومات مادية "physical information" يدخل في حسابها عدد الكور وقطرها والمسافة بين

مركز عنصرين متدحرجين متعاكسين "pitch diameter" وزاوية التلامس "contact angle" وخلافه.



وسوف تحتاج إلى الحصول على المعلومات الأساسية التالية لرولمان البللى والتى من الصعب الحصول عليها هذه الأيام وهى:-

قطر العناصر المتدحرجة "Rolling Elements Diameter".

المسافة بين مركز عنصرين متدحرجين متعاكسين "Pitch Diameter".

عدد العناصر المتدحرجة "Number of Rolling Elements".

زاوية التلامس "Contact Angle".

السرعة "Speed".

$$\text{Formula1: FFT} = \frac{S}{2} \times \left\{1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos\theta\right)\right\}$$

$$\text{Formula2: BSF} = \frac{Pd}{2Bd} \times S \times \left\{1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos\theta\right)^2\right\}$$

$$\text{Formula3: BPFO} = \frac{Nb}{2} \times S \times \left\{1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos\theta\right)\right\}$$

$$\text{Formula4: BPFI} = \frac{Nb}{2} \times S \times \left\{1 + \left(\frac{Bd}{Pd} \times \cos\theta\right)\right\}$$

حيث:-

"FTF" وهى ترددات القفص "cage" "Fundamental Train Frequency".

"BSF" وهى ترددات العناصر المتدحرجة "Ball Spin Frequency".

"BPFO" وهى تردد الجلبة الخارجية "Ball Pass Frequency of the Outer race" وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الخارجية.

"BPFI" وهى تردد الجلبة الداخلية "Ball Pass Frequency of the Inner race" وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الداخلية.

"Nb" عدد العناصر المتحركة "number of rolling elements".

"S" السرعة (لفة لكل ثانية) "speed".

"Bd" قطر العناصر المتحركة (بوصة أو مللمتر) "ball diameter".

"Pd" المسافة بين مركزعنصرين متدحرجين متعاكسين (بوصة أو مللمتر) "Pitch Diameter".

"θ" زاوية التلامس (درجة) "Contact Angle".

هذه المعادلات الحسابية معقدة نوعاً ما، وليس من المتوقع منك أن تحسبها فى رأسك! فمعظم حزم البرمجيات تحتوى على برامج متخصصة بها مكتبات "libraries" تشتمل على بيانات رولمان البللى المنتجة بواسطة شركات مختلفة والتى تمكنك من البحث عن رولمان البللى لحساب الترددات القسرية الأربعة.

وبمجرد معرفة نوع رولمان البللى "type of bearing"، ومعرفة سرعة دورانه يمكنك حساب ترددات رولمان البللى بنفسك عن طريق المعادلات أو من خلال تلك البرامج.

مثال:- إذا كان هناك عيوب مضاعفة فى رولمان البللى فيكون حساب ترددات عيوب البللى "defect frequency" كالتالى:

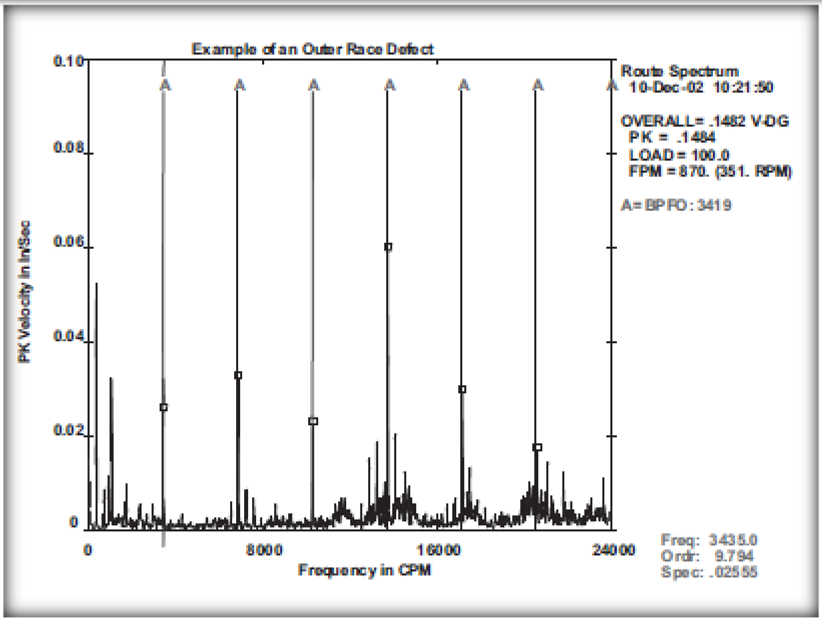
Bearing ID	#of Rolling Elements	FTF	BSF	BPFO	BPFI
9436	19	0.434	3.648	8.247	10.753
9437	19	0.434	3.648	8.247	10.753
9442	22	0.443	4.191	9.740	12.260

١- إنظر إلى رقم رولمان البللى "Bearing ID" الذى يظهر تردد الإهتزازات المتوقع (9.740) وهو تردد الجلبة الخارجية "BPFO".

٢- قم بضرب هذا التردد فى سرعة العمود المثبت عليه رولمان البللى تحصل على تردد الجزء المعيب كالآتى:-

٩.٧٤٠ × ٣٥١ (rpm shaft speed) = ٣٤١٩ (cpm).

إنظر إلى بصمة الإهتزازات التالية والتى تظهر تردد الجلبة الخارجية لرولمان البللى " Outer Race Bearing Defect":-



إذا كان التردد وتوافقاته (مضاعفاته) "harmonics" موجود فى بصمة الإهتزازات "vibration spectra" فمن المحتمل وجود عيب فى الجلبة الخارجية لرولمان البللى.

وفى هذه الحالة من الممكن أن يكون هناك شوائب على المجارى "raceway"، تسرب التيار الكهربى، سوء التخزين أو النقل، إلخ.

وجود أى من هذه الترددات الأربعة الأساسية لإنهيار رولمان البللى يؤدى إلى إستبدال رولمان البللى بواسطة فنى إصلاح متخصص والتأكد من أن يكون بيت البلية "housing fits" والجلبة الداخلية "shaft journals" لرولمان البللى فى الحدود المسموحة "within tolerance".

١-٢-١- ملاحظات على حساب الترددات القسرية

١- أسباب عدم تطابق ترددات رولمان البللى المحسوبة مع الترددات التى تظهر فى بصمة الإهتزازات.

يوجد حالات كثيرة عند حساب ترددات خلل رولمان البللى أن هذا التردد لا يتطابق تماماً مع ترددات رولمان البللى التى تظهر فى بصمة الإهتزازات وذلك للأسباب الآتية:-

- إرتفاع الأحمال عن الحمل الطبيعى "thrust loads" الذى يجعل رولمان البللى يعمل عند زاوية تلامس مختلفة "contact angle".

- عدم السنترة "misalignment" هى السبب فى زيادة الحمل الغيرالطبيعى " abnormal thrust loads".

- ليس كل الشركات المصنعة لرولمان البللى تستخدم نفس العدد من العناصر المتدحرجة لنفس مقاس رولمان البللى "bearing size".

٢- فى حالة حساب ترددات العناصر المتدحرجة (الكور/البلح) "BSF" فيجب مضاعفة قيمة التردد لأن تلك (الكور/البلح) تصطدم "strike" إما بالجلبة الخارجية أو الداخلية "inner OR outer race" وإذا كان الخلل (بالكور/البلح) "ball/roller" فإنها تصطدم بالجلبة الداخلية والخارجية وبالتالى يجب مضاعفة الترد.

٣- ولتبسيط الأمور، هناك بعض التجارب قد يكون من المفيد معرفتها فإذا كنت تعرف قيمة كل من تردد الجلبة الداخلية والخارجية "BPO-BPI" يمكننا جمعهما لتحديد عدد (الكور/البلح) "ball/roller". فمثلاً إذا كانت قيمة "BPO" هى X٣.٢ وقيمة "BPI" هى X4.8 فيجب أن يكون عدد الكور ٨.

Number of balls[rollers] = BPI + BPO

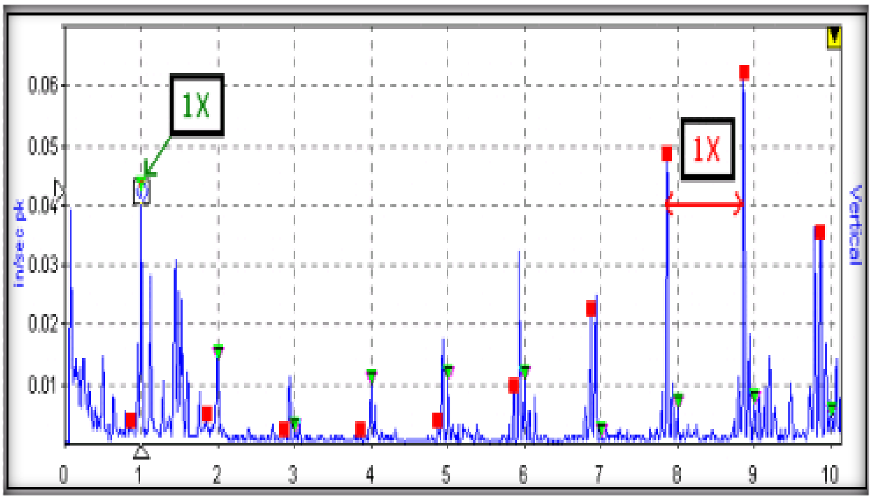
٤- يمكن معرفة عدد الكور من خلال التفتيش (الفحص) "inspection"، وإذا أمكنك معرفة إحدى الترددات القسرية من البصمة أو من أى مصدر آخر، يمكن حساب الآخر.



BPI = Number of balls[rollers] - BPO

BPO = Number of balls[rollers] - BPI

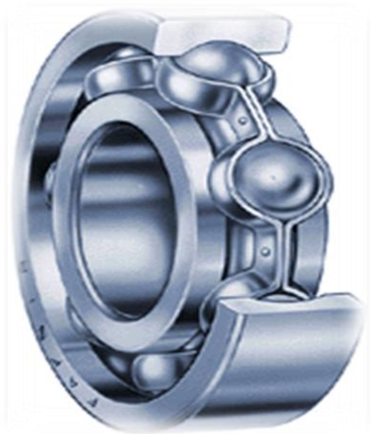
٥- عند تحليل الإهتزازات سوف ترى أن تردد الجلبة الداخلية "inner race peak" "BPI" سوف تحاط بترددات X١ "sidebands" (الماكينات الأفقية)، وبمعرفة عدد الكور يمكننا حساب تردد الجلبة الخارجية "BPO".



٦- بحكم التجربة وجد أنه يمكننا حساب ترددات رولمان البللى (التى تحتوى عدد من الكور يتراوح بين ٨ إلى ١٢ كورة/بلحة) إذا عرفنا سرعة الدوران وعدد الكور فوجد أن تردد الجلبة الخارجية "BPo" تساوى ٠.٤ من عدد الكور، وتردد الجلبة الداخلية "BPI" تساوى ٠.٦ من عدد الكور أما تردد القفص "FTF" فيساوى ٠.٤X.

Defect on inner race	(BPI)	=0.6 n N
Defect on outer race	(BPo)	=0.4 n N
Defect on cage	(FTF)	=0.4 n

Where N= Speed (CPM), n = Number of balls



مثال١:- إذا إستخدمنا رولمان بللى يحتوى على ٩ كور "balls" وإذا إستخدمنا القاعدة سوف نحصل على تردد كل من الجلبة الخارجية "BPFO" (٣.٦) وتردد الجلبة الداخلية "BPFI" (٥.٤) وترددات العناصر المتدحرجة "BSF" (٢.٤) وأخيراً ترددات القفص "FTF" (٠.٤).

مثال٢:- وإذا أخذنا هذه الترددات كما لو كانت "orders" أى ترتبط مباشرة بسرعة دوران الماكينة مثال ذلك (FTF وهى ترددات القفص = ٠.٤X) ثم كل ما عليك القيام به لحساب التردد النهائي هو ضربها في سرعة دوران العمود المركب عليه رولمان البللى.

٧- خلاصة القول أن أى مشكلة فى رولمان البللى سوف تظهر فى بصمة الإهتزازات ترددات ليست مطابقة لسرعة الدوران أو مضاعفاتها (X١). وبعبارة أخرى ترددات غير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous". والمحلل يقوم بالتأكد من أن هذه الترددات ليست تابعة لمصادر أخرى للتأكد من التشخيص.

وهذه الترددات الغير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous" فى بصمة الإهتزازات هى العلم الأحمر "red flag" لمهندس تحليل الإهتزازات بأن مشاكل رولمان البللى قد تكون موجودة، وإذا كان هناك أيضاً توافقات لهذه الترددات "harmonics" ومحاطة على الجانبين "sidebands" فإن إحتمالات وجود مشكلة فى رولمان البللى تصبح عالية جداً وربما لا تحتاج إلى معرفة الترددات القسرية لرولمان البللى.

٨- مشاكل رولمان البللى الأكثر شيوعاً هى مشكلة الجلبة الخارجية "outer race defect" والتى تقع فى منطقة الحمل "load zone"، ويليها مشكلة الجلبة الداخلية "inner race faults" أى أقل شيوعاً ومن النادر أن ترى مشاكل للعناصر المتدحرجة "ball spin frequency".

١-٣- الترددات القسرية لعناصر نقل الحركة "Transmission components"

هناك عدد من أنواع وسائل نقل الحركة (نقل القدرة) والتى تستخدم فى تغيير سرعة الماكينات. والأنواع الشائعة منها هو صندوق التروس، حيث يأتى بأحجام وأشكال متنوعة، وكذلك سيور نقل الحركة. وسوف نلقى نظرة على تلك الأنواع.

في المثال الأول لدينا صندوق تروس بسيط جداً يخفض السرعة إلى النصف. نسبة السرعة "speed ratio" لصندوق التروس (أو سيور نقل الحركة "belt drive"، والوصلات السائلة " fluid couplings"، أو أى ناقل حركة آخر) عادةً ما تعرف (كفائد : منقاد) (driven:driver) وفى مثالنا هى ١:٢ فإذا كان دخل "input" صندوق التروس (2000 CPM)، خرج الصندوق سوف يكون (1000 CPM).

فى تحليل الإهتزازات، يجب تحديد نسبة السرعة للمكونات مثل صناديق التروس "gearboxes"، وسيور نقل الحركة "belt drives"، وجنازير نقل الحركة "chain drives"، والوصلات السائلة "fluid couplings" وغيرها من أجهزة النقل "transmission devices ". يمكنك القيام بذلك عن طريق قياس السرعات الداخلة والخارجة "input and output" بأجهزة قياس السرعة (الفوتوتاك و الإستروب الضوئى)، أو بإستخدام المعلومات المادية وحساب النسبة.

١-٣-١- الترددات القسرية لصندوق التروس "Gearbox forcing frequencies"

مقدمه:-

صندوق التروس هو آلة ميكانيكية تقوم بتقوية (أو تخفيف) عزم الدوران ميكانيكياً عن طريق عدة تروس ينتج عنها تخفيض (أو رفع) سرعة الدوران. علماً بأن ٩٠% من صناديق التروس تعتبر مخفضة للسرعة وبالتالي هي تهتم بزيادة عزم الدوران في حين أن ١٠% منها يعتبر مخفض للعزم وبالتالي هي تهتم بزيادة السرعة، حيث أن عزم الدوران يساوي القدرة مقسومة على سرعة الدوران.

إستخدامه:- تستعمل صناديق التروس استعمالاً واسعاً في شتى التطبيقات الميكانيكية التي تعتمد في إنتاجها على توليد عزم دوران أكبر للقيام بمهمة ما أو زيادة سرعة الدوران للقيام بتلك المهمة، حيث تعتبر الوسيلة المثلى لتوليد العزم أو زيادة السرعة الدورانية في أغلب الأحيان. كما انه لا يكاد يخلو مصنع أو منشأة صناعية من استخدامها ولو في أبسط أشكاله. ونحن نستخدم صناديق

التروس في حياتنا اليومية العامة متمثلة في وسائل النقل المختلفة مثل السيارات والطائرات وغيرها.

العمر الإفتراضي:- يحدد عمر صندوق التروس بالحمل على أسنان الترس وسرعة الترس. حيث أن لكل صندوق سرعة مصممة عليه مسبقاً؛ إذا تجاوزها المستخدم فإن العمر الافتراضي لصندوق التروس يصبح أقل مما هو مصمم عليه. كما أن بعض صناديق التروس تزود بالرسوم البيانية المطلوبة لحساب العمر الافتراضي لها عند ظروف التشغيل المختلفة.

سوف نلقى نظرة فاحصة على صندوق التروس. و يمكنا وضع سرعة التغيير كنسبة بين الدخل إلى الخرج فى شكل (I:O). على سبيل المثال (٤:١) أى أن السرعة سوف تزيد مع خرج الصندوق ٤ مرات أسرع من دخل الصندوق.

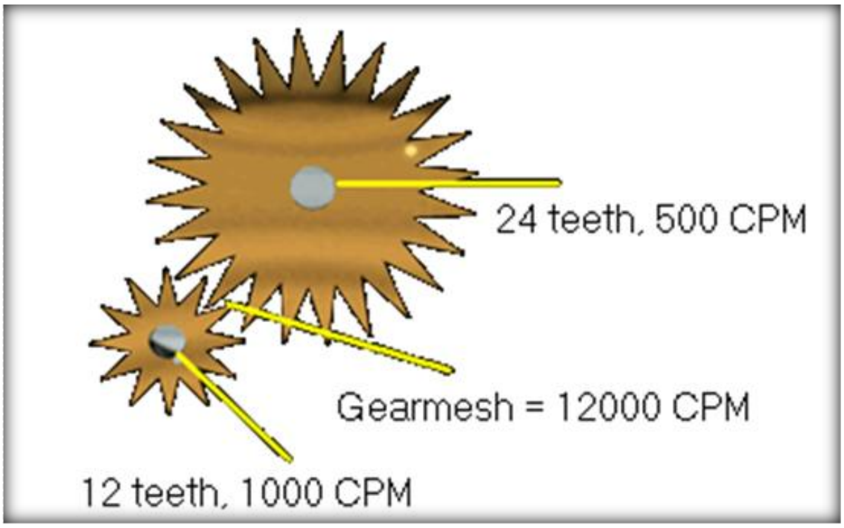
ولن نناقش الطرق المستخدمة لتشخيص الأعطال في صندوق التروس في هذا الوقت.

هناك تردد قسرى واحد رئيسى فى حاجة إليه لحساب تردد تعشيق التروس "gear mesh". ويتم حساب تردد تعشيق التروس وذلك بضرب عدد الأسنان فى سرعة عمود الدوران.

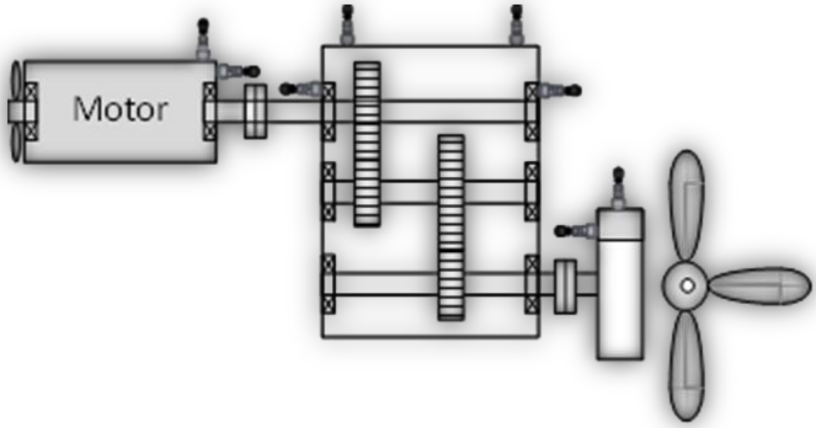
وفى هذا المثال لدينا ١٢ سنة "teeth" على الدخل "input" و ٢٤ سنة على الخرج "output".

وتردد تعشيق التروس "gear mesh frequency" ١٢ مرة (أضعاف) سرعة الدخل، أو ٢٤ مرة سرعة الخرج.

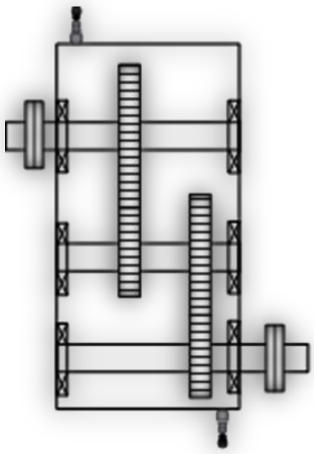
وبالنظر إلى المثال. إذا كانت سرعة الدوران الداخلة لصندوق التروس ١٠٠ سيكل فى الدقيقة (CPM) وبالتالى تردد تعشيق التروس يساوى ١٢٠٠٠ (CPM). سرعة خرج "output" صندوق التروس هو ١٠٠٠*٢٤/١٢ أو ٥٠٠ (CPM). وبالتالى تردد تعشيق التروس هو ٥٠٠*٢٤ يساوى ١٢٠٠٠ (CPM).



الماكينة التى لدينا هى بسيطة جداً ويوجد بها صندوق التروس.



علبة التروس نفسها تولد ترددات جديدة (تعشيق التروس مع بعضها)، ولكن الأهم حالياً هى أنها تغير من سرعة العمود الخارج "output shaft".

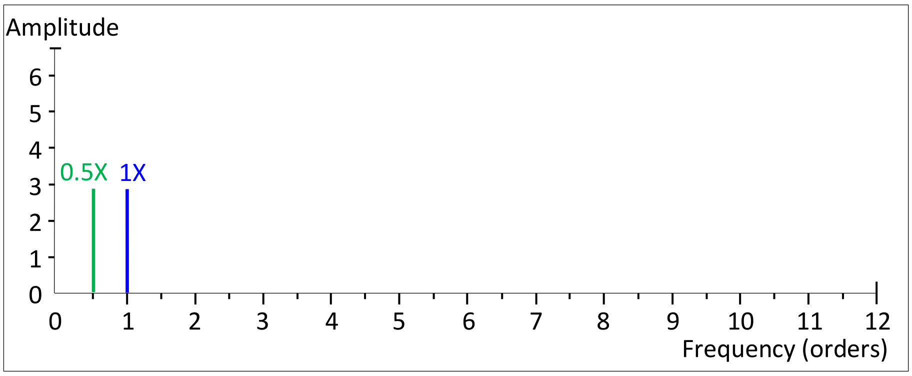


حساب السرعة الخارجة من صندوق التروس بسيطة نسبياً. ببساطة قسمة عدد أسنان ترس الداخل "input pinion" على عدد أسنان الترس الخارج "output pinion" مضروباً فى سرعة العمود الداخل "input shaft".

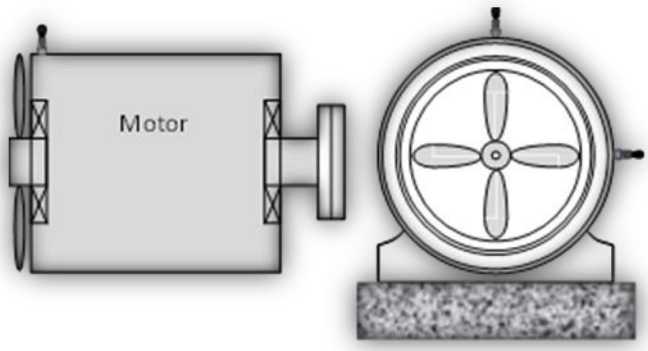
$$\text{السرعة الخارجة} = \frac{\text{عدد أسنان الترس الداخل}}{\text{عدد أسنان الترس الخارج}} \times \text{سرعة العمود الداخل}$$

على سبيل المثال، الترس الداخل له ١٢ سنة "teeth"، والترس الخارج له ٢٤ سنة، وبالتالى سرعة العمود الخارج سوف يدور بنصف سرعة العمود الداخل. وإذا كانت سرعة دوران العمود الداخل عند ١٠٠٠ CPM، فإن السرعة الخارجة تكون ٥٠٠ CPM.

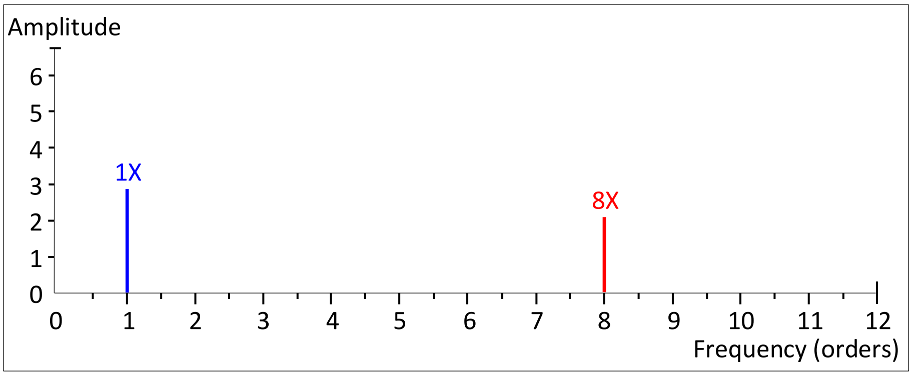
وإذا أضفنا صندوق التروس إلى الكومبروسور، ماذا يحدث؟ إذا كان الموتور لا يزال يدور بسرعة ١٠٠٠ CPM، وصندوق التروس به ١٢ و ٢٤ سنة كما بالمثال السابق، وسرعة العمود الخارج هى ٥٠٠ CPM. وبالتالى يكون هناك سرعتيين واحدة عند X1 للعمود الداخل و٠,٥ X للعمود الخارج.



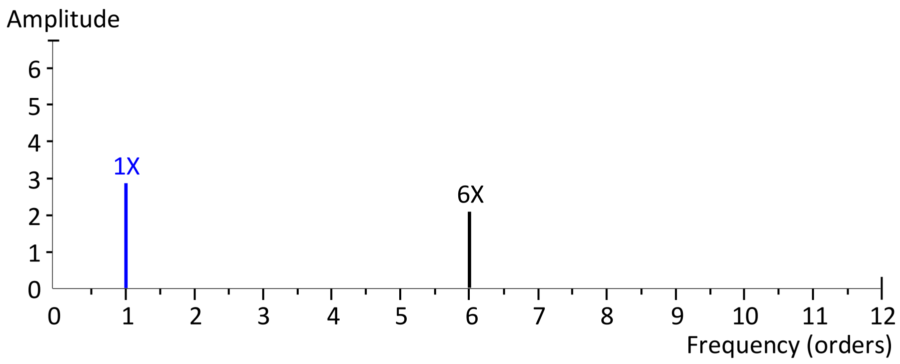
ماذا عن تردد ريش مروحة الموتور. ما هو تردد ريش المروحة "blade pass"؟ هل هو ضعف ما كان عليه؟ أو هو نصف ماكان عليه؟ أو إنه لم يتغير؟



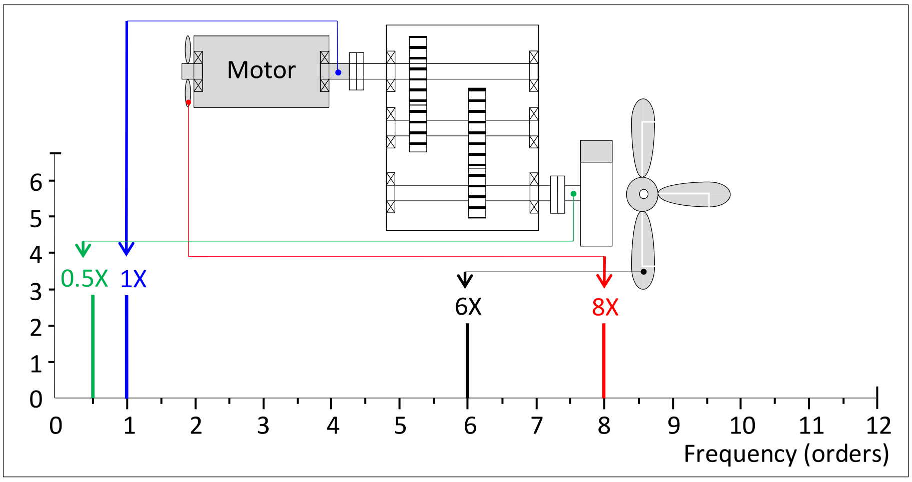
بطبيعة الحال فإنه لم يتغير، لأن سرعة الموتور لم تتغير، ولأن المروحة متصلة مباشرة مع محور الموتور.



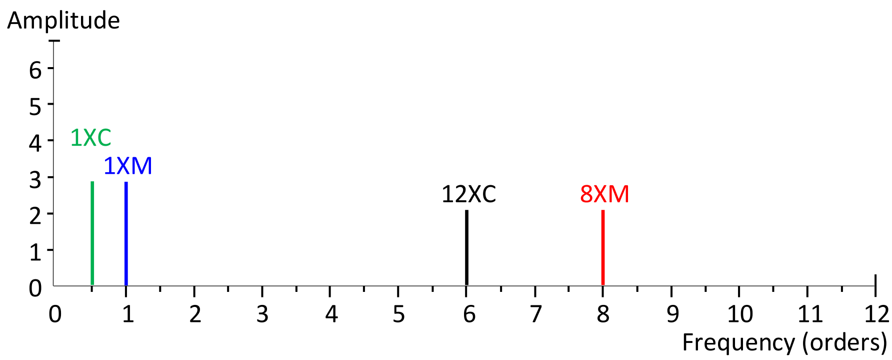
الآن ماذا عن تردد ريش الضاغط "vane pass"؟ مازلنا نرى ١٢ ريشة، ولكن تردد الريش سيكون ٦ مرات تردد سرعة الموتور (ولكن لاتزال ١٢ مره سرعة عمود الضاغط).



حتى الآن سوف تحتوى البصمة على تردد X١ بسبب المحرك وX٠,٥ بسبب عمود الكومبرسور وX٨ بسبب ريش مروحة الموتور وأخيراً X٦ بسبب ريش الكومبرسور.



للحفاظ على وضوح الترددات المنسوبة لكل جزء يمكن تسمية كل عمود بإسمه فيكون عمود الموتور "XM" وعمود الكومبرسور "XC". ومن الممكن بعد ذلك تسمية الترددات القسرية نسبة إلى مكونات كل عمود أو الجزء كما فى البصمة الآتية.

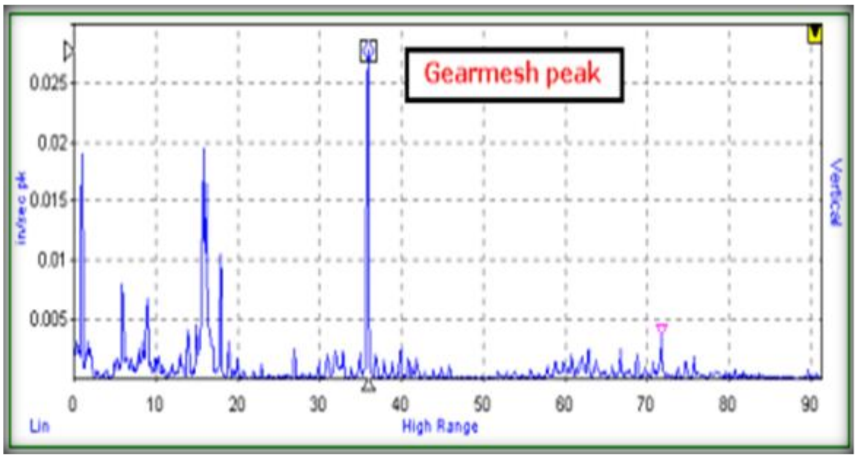


١-٣-٢- صندوق تروس متعدد المراحل "multi-stage gearboxes"

الآن سوف ننظر في صندوق التروس المتعدد المراحل. بإختصار، يتم حساب سرعة الخروج للصندوق بأخذ تداخل التروس فى الحسبان، ويتم حساب تعشيق التروس مرة أخرى بإعتبارها حصيلة عدد الإسنان وسرعة الترس، وبالتالى يجب أخذ الأعمدة المتوسطة فى الحسبان.

ونقوم الآن بحساب السرعة عند كل عمود. يجب أن نبدأ عند العمود الداخل للصندوق " input shaft"، وحساب نسبة تعشيق التروس، ومن ثم نصل إلي سرعة عمود الخارج "output shaft" من الصندوق. وإذا كان العمود يقود "drives" مجموعة أخرى من التروس، التى نشير إليها بإعتبارها أعمدة وسيطة "intermediate shaft". ثم ننتقل إلي المجموعة التالية من التروس "gear-set"، ونحسب النسبة "ratio" كما سبق، ولكن يجب إضافة نسبة السرعة "speed ratio" للأعمدة الوسيطة.

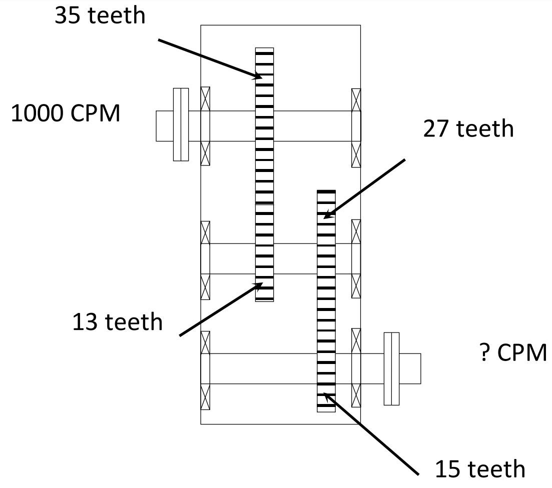
هل سيكون عندك القدرة لمعرفة نسبة نقل السرعة للتروس "gear ratios"، وحتى لو كنت لا تعرف عدد الأسنان "teeth" نفترض أن عدد الأسنان من الأعداد الأولية أو بالنظر إلى التردد العالى (peak) فى البصمة.



سيتم كتابة النسب كالآتى:- الإدخال "Input" : المتوسطة "Intermediate" : الإخراج "Output".

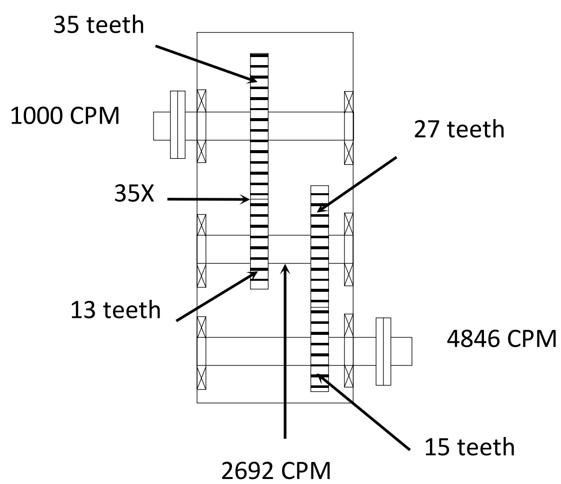
على سبيل المثال، ١:٨:١٧ تعنى أن السرعة المدخلة "input speed" (1000 CPM) ستؤدى إلي أن تكون السرعة الخارجة "output speed" (17000 CPM) وتكون السرعة المتوسطة "intermediate speed" (8000 CPM).

مثال:- فى صندوق التروس لدينا ترس له ٣٥ سنة "teeth" على العمود الأول "input shaft" و١٣ سنة "teeth" على العمود المتوسط "intermediate shaft". والترس الثانى على العمود المتوسط له ٢٧ سنة، ١٥ سنة على العمود الخارج "output pinion".

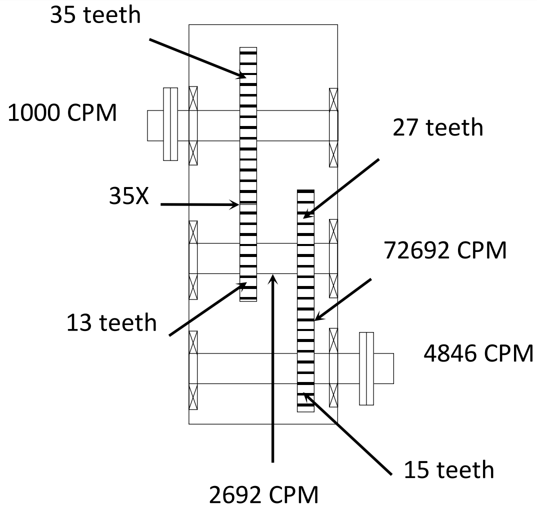


دعنا ننظر إلى الزوج الأول من التروس "first pair of gears". نسبة الأسنان هى ١٣/٣٥ تساوى ٢,٦٩٢. أى أن السرعة سوف تزداد بمعامل ٢,٦٩٢ خلال المرحلة الأولى "first stage" وهذا يعنى أن العمود الأوسط يدور بسرعة (2692 CPM). ويمكننا أيضاً حساب تعشيق التروس للمرحلة الأولى. ستكون (35X) حيث عدد الأسنان ٣٥ سنة للعمود الأول "input pinion".

والآن يمكننا حساب السرعة وتردد تعشيق التروس للعمود الخرج "output shaft". النسبة لمجموعة التروس "gear-set " للمرحلة الثانية هى ١٥/٢٧ = ١,٨٠ . وبالرجوع إلى العمود الأول (الإدخال)، وبالتالى تكون السرعة هى 2.692 * 1.80 = 4.846 وبالتالى تكون السرعة (4846 CPM).



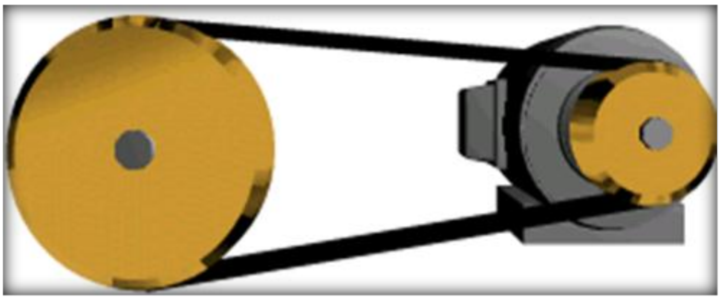
وأخيراً، تردد تعشيق التروس يكون عدد الأسنان للترس الأول على عمود المرحلة الثانية مضروباً فى سرعة العمود الأوسط "intermediate shaft" (2.692*٢٧)، أو عدد الأسنان للعمود الخرج "output shaft" مضروباً فى سرعة الخروج "output speed" (4846*١٥). وفى كلتا الحالتين يتعلق الأمر إلى (X ٧٢,٦٩) أو (72692 CPM).



مهما كان صندوق التروس يظهر معقداً، يجب أن تبدأ من خلال مجموعة تروس "gear-set" واحدة في كل مرة. وتحديد سرعة كل عمود وضربه بنسبة التروس التالية "next gear ratio".

١-٣-٣- سيور نقل الحركة "Belt drives"

سيور نقل الحركة هى أيضاً شائعة جداً في الصناعة مثل صندوق التروس. وتستخدم هذه السيور لنقل الحركة الدورانية من عمود "shaft" الى آخر وتؤثر في تغيير السرعة. وتستخدم هذه السيور عادةً في أنظمة التسخين والتهوية والتبريد.



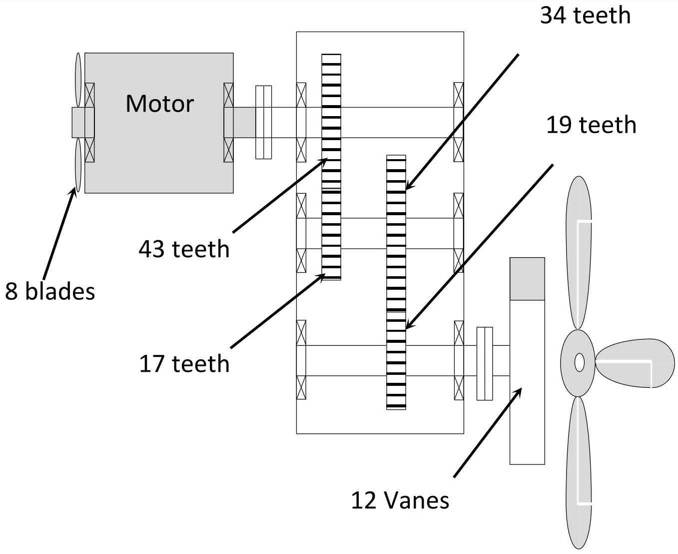
حساب نقل الحركة للسيور كما لو كانت صندوق تروس بمرحلة واحدة "single stage". يجب عليك تحديد قطر الطنبورة، وحساب نسبة السرعة (قطر الطنبورة القائد/قطر الطنبورة المنقاد) أو

(Speed ratio = Input sheave diam. / Output sheave diam.)

وكلما قمت بإجراء هذه الحسابات يجب أن تتذكر دائماً أنه إذا كان حجم الطنبورة الثانية هى الأكبر فمن الطبيعي أن الماكينة ستكون أكثر بطأً.

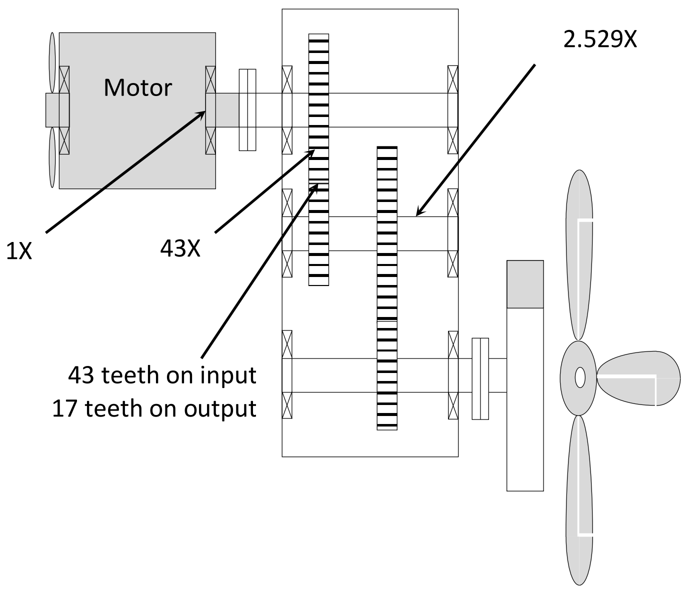
١-٣-٤- ماكينة معقدة "complex machine"

سوف نقوم بإستبدال صندوق التروس بمرحلة واحدة "single stage" مع صندوق تروس بمرحلتين "two-stage". ونبدأ الآن في حساب جميع الترددات القسرية "forcing frequencies".



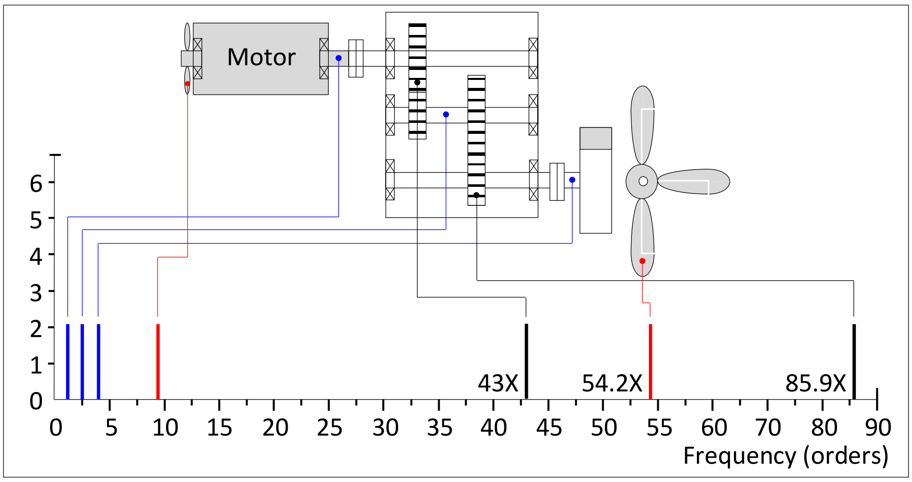
سوف نذكر بعض تفاصيل هذه الماكينة. مروحة التبريد لها عدد ٨ ريش "blades"، والضاغط له ١٢ ريشة "vanes". صندوق التروس له ٤٣ سنة "teeth" على العمود الأول "input pinion"، و١٧ سنة على العمود الأوسط "intermediate shaft" . تعشيق التروس الثانى فيه ٣٤ سنة على الدخل و ١٩ سنة على الخرج.

نعتبر المحرك هو الأساس فيكون العمود الأول سرعته هى سرعة الموتور وهو أول تعشيق تروس. وسرعة العمود المتوسط تكون (٤٣/١٧ = X ٢,٥٢٩). ويجب أن يكون تردد تعشيق التروس X٤٣.



وتعشيق التروس التالى هو (٣٤/١٩ أو X١,٧٨٩). وبالتالى، سرعة زوج التروس يكون X٢,٥٢٩ سرعة الموتور، وبالتالى تكون سرعة عمود الخروج لصندوق التروس هى ٢,٥٢٩ X ١,٧٨٩ = ٤,٥٢٤ X.

والبصمة التالية تمثل كل الترددات السابقة وهى تبدو معقدة نوعاً.



القسم الثالث:– مراحل تحليل بيانات الإهتزازات

مقدمه:–

يوجد أربع مراحل لتحليل بيانات الإهتزازات "four phases of vibration analysis" حيث أن إكتشاف العطل مختلف عن تحليله وهناك فرق كبير بين إكتشاف المشكلة وتحليل أسبابها وذلك لمنع تكرارها.

فمثلاً تغيير رولمان البللى المتآكل والذى يظهر بوضوح فى تحليل الإهتزازات ربما لا يحل المشكلة ولكن يجب البحث عن الأسباب التى تؤدى إلى إنهياره وتتمثل فى (عدم المحورية – التفكك – عدم الإتزان – .... إلخ) .

وإذا لم يتم معرفة أسباب المشكلة والتى تؤدى إلى حدوث العطل فإننا فى هذه الحالة لا نطبق برنامج رصد حالة الماكينات "Condition monitoring program" بل إننا نطبق برنامج آخر وهو برنامج تغيير رولمان البللى "Bearing exchange program".

والأربع مراحل لتحليل بيانات الإهتزازات هي:–

١– مرحلة إكتشاف المشكلة "detection phase".

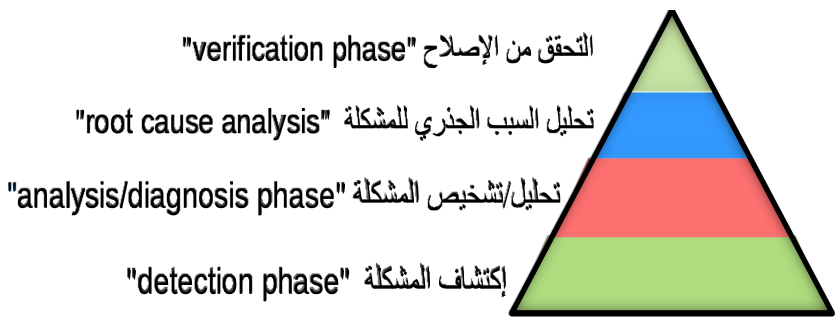
٢– مرحلة تحليل وتشخيص المشكلة "analysis/diagnosis" لمعرفة مدى الخطورة "severity".

٣– مرحلة تحليل السبب الجذري للمشكلة "root cause".

٤– مرحلة التحقق من إصلاح المشكلة "verification".

ويسمى الشكل التالى التحليل الهرمى "Analysis Pyramid"، حيث شكل الهرم يمثل عدد الماكينات المشاركة فى كل مرحلة من المراحل الأربعة (ليس الوقت والجهد أو الأهمية أو المهارات المطلوبة) في قاعدة الهرم حيث المرحلة الأولى وهى مرحلة الكشف "detection phase".

نحن في حاجة الى طريقة للذهاب من خلالها إلى بيانات كل ماكينة لتحديد الماكينات التى بها مشاكل وتستحق الفحص. وعلينا أن نحاول أن تكون هذه العملية أتوماتيكية.



ثم تأتي الرحلة الثانية وهى مرحلة التحليل والتشخيص "analysis/diagnosis"، ويجب أن تشمل عدداً أقل بكثير من الماكينات. ونحاول أن يكون جزء من هذه العملية أتوماتيكية حتى يكون لدينا

مؤشر على طبيعة المشكلة "nature" ومدى خطورة المشكلة "severity". وبعد إجراء تحليل على البيانات التى جمعناها من خلال القياس الروتينى اليومى، نكون قادرين على التمييز بين الماكينات التى تحتاج إلى إجراء فورى وهى قليلة والأخرى التى لاتحتاج إلى أخذ إجراء وهى كثيرة.

وبناءًا على شدة وطبيعة المشكلة وفلسفة الصيانة ومتطلبات الإنتاج يمكن أخذ قرار يوصى بإيقاف الماكينة للإصلاح.

ثم تأتى المرحلة الثالثة وهى مرحلة تحليل السبب الجذرى للمشكلة "root cause analysis" وهى في أعلى الهرم حيث مجموعة قليلة من الماكينات. وفى هذه المرحلة نحن بحاجة لإجراء تحليل لمعرفة الأسباب الجذرية "root cause analysis" بحيث لا تنشأ المشكلة مرة أخرى، وفى النهاية تأتى المرحلة الرابعة والأخيرة وهى مرحلة التحقق من الإصلاح "verification" حيث أننا دائماً بحاجة للتحقق من الإصلاح والتشغيل الصحيح بمجرد عودة الماكينة للخدمة.

يجب أن يكون هدفنا هو الإبتعاد عن قاعدة الهرم "base of the pyramid" فى أسرع وقت ممكن حتى يمكننا قضاء مزيد من الوقت فى إتجاه الجزء العلوى. حيث إنك تقدم فائدة كبيرة لمصنعك عندما تقضى وقتاً لتشخيص وتحليل العطل والتحقق من الإصلاح وعمل التوصيات اللازمة لكى نتجنب فى المستقبل عودة تلك المشاكل مرة أخرى.

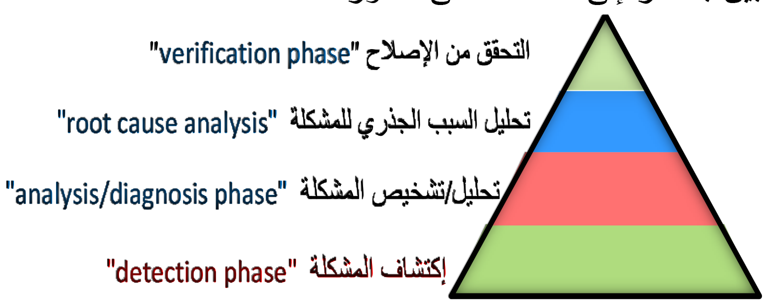
١- المرحلة الأولى:- مرحلة إكتشاف المشكلة "detection phase"

بعد جمع بيانات الإهتزازات بالموقع بإستخدام جهاز جامع البيانات "data collector" وتوصيل الجهاز بالكمبيوتر لتفريغ البيانات "dump data" إلى القرص الثابت. يمكننا عرض قياسات كل ماكينة من خلال برنامج الصيانة التنبؤية حيث تقوم تلك البرامج بتبسيط هذه المهمة.

ومن خلال النظر إلى منحنى الطور"trend data" وبصمة الإهتزازات والترددات الرئيسية فى النطاقات المختلفة "in bands"

وإلى إحتمالية تنفيذ قياسات خاصة أخرى لتسهيل إكتشاف المشكلة إذا تطلب الأمر ذلك.

وحيث تلك القياسات تمثل عدداً كبيراً من الميجابايت وإذا إفترضنا أننا راجعنا قياسات عدد ٢٠ ماكينة على سبيل المثال، ومع إفتراض أن لكل ماكينة أربعة أو خمس نقط قياس، وكل نقطة لها ٦ نطاقات للتردد، فإننا مطالبين بالنظر إلى ٦٠٠ منحنى للطور "trend data".



ولكن ماذا تفعل مع هذا الكم الكبير من البيانات؟ لو كنت تريد تحليل كل قياس بمفرده (والذي يفعله كثير من الناس)، فسوف تحتاج قدراً كبيراً من الوقت بالإضافة إلى الحاجة إلى مستوى عال من التركيز والمثابرة.

وإذا فقدت شئ من التركيز، فإن شئ ما قد يفوتك مالم تكن المشكلة مع الماكينة واضحة وحادة، يمكنك أن تفقد علامات الإنذار المبكر وبالتالي تزيد فرصة فقد بعض الدلائل الحاسمة لمعرفة المشكلة.

ولذلك فإننا فى أشد الحاجة إلى نظام فحص وغربلة "screening" لإكتشاف المشاكل. وهذه هى المهمة الأولى لمجموعة البرامج الخاصة بالإهتزازات "software package" وهى إكتشاف مشاكل الماكينات "detection".

حيث يقوم البرنامج بمقارنة مستويات الإهتزازات التى تم قياسها حالياً بمجموعة من مستويات الإنذار"alarm limits" والمحسوبه مسبقاً لتلك الماكينة. حيث أن البرنامج يقوم أتوماتيكياً بعمل أنماط ومستويات تحذير مختلفة عند بدء تطور حالة المعدة وحتى فى الحالات المبكرة منها.

وأيضاً من خلال دراسة بعض التقارير الإستثنائية "exception report" المزود بها برنامج الصيانة التنبؤية لمعرفة الماكينات التى بها مشاكل.

٢- الأساليب الأتوماتيكية للفحص والغربلة "screening"

وسوف نناقش الأساليب الإتوماتيكية للفحص والغربلة "screening" لإكتشاف مشاكل الماكينات.

٢-١- التقارير الإستثنائية "exception reports"

لسنوات عديدة شملت حزم البرمجيات الكبرى على تقارير إستثنائية. البرنامج يقوم بمسح بيانات قياسات الإهتزازات الجديدة ومقارنتها بحدود الإنذار "alarm limits"، ومقارنة هذة القياسات بالقياسات السابقة، وإخراج قائمة بالماكينات التى بها مشاكل "failed"، وتعطى مؤشراً على خطورة المشكلة "severity". حيث أن الماكينات التى بياناتها أعلى بكثير من مستوى الإنذار تعامل بشكل مختلف عن الماكينات التى تتجاوز مستوى الإنذار بشكل طفيف.

٢-٢- وضع حدود الإنذار "Setting alarm limits"

عندما يكون هناك قراءة جديدة سواء أكانت قراءة بسيطة مثل المستوى العام للإهتزازات " overall level" أو بصمة كاملة "spectrum"، فإنه من أكبر التحديات التى تقابلنا هو تحديد المستويات (الحدود المقبولة والحدود غير المقبولة) وعند أى نقطة يمكننا زيادة مراقبة أومتابعة الماكينة وعند أى نقطة أيضاً يمكننا أن نوصى بإصلاح الخلل.

نحن بحاجة إلى وسيلة بأن نقول عند مستوى إهتزاز معين للماكينة فإنها بحالة جيدة (OK)، وفوق هذا المستوى تكون بحاجة إلى إصلاح.

وللأسف ليس هذا الأمر بهذه السهولة.

والمستوى المرجعي يتحدد بعوامل كثيرة منها، حجم الماكينة "size of the machine"، الحمل "load"، أهمية الماكينة والسجل التاريخ وكلها عوامل مهمة.

على سبيل المثال، الآلات الدقيقة "precision machine" لا تهتز بنفس ماكينة طاحونة الكرة " ball mill". والماكينة التى تعمل عند ٢,٥٤ مم/ثانية هى أقل أهمية من الماكينة التى تعمل عند ٠,١٣ إلى ٢,٥٤ مم/ثانية.

وسوف نكون أكثر قلقاً بشأن الإهتزازات العالية على الماكينات الأكثر أهمية "most critical" والأكثر تكلفة من الماكينات الأقل أهمية "less critical" وأقل تكلفة.

ولكننا لانزال نحتاج إلى مرجعية أساسية لكل ماكينة لمقارنتها بالقراءات الجديدة حيث يوجد طريقتان لوضع مستوى الإنذار المرجعى "reference alarm level" وخاصة عند بداية تشغيل نظام الإهتزازات حيث يمكن الرجوع إلى أحدهما – الأول هو الإستفادة من الإصدارات المكتوبة "published alarm limits" [illegible] "fixed alarm limits". والثانى هو أن نبدأ مع قراءات الإهتزازات الموجودة وعمل عمليات حسابية للتوصل إلى حدود الإنذار. وهناك إيجابيات وسلبيات لكل من الطريقتين.

٢-٣- حدود الإنذار الثابتة "fixed alarm limits"

القراءة الواحدة للمستوى العام للإهتزازات "overall levels" والمأخوذة من على الماكينة، عادةً ما تكون فى حدود ١٠ هرتز إلى ١٠٠٠ هرتز "Hz". ولكن ماذا لو وضعنا حدود الإنذار لبصمة الإهتزازات أو نطاق الإنذار "band alarms" وهى المعروفة فى حزم البرامج للصيانة التنبؤية "analysis parameter sets"؟ سيكون ذلك أكثر صعوبة.

القمة "peak" عند سرعة الدوران تكون أعلى فى بصمة الإهتزازات، ولكن ليس ذلك دائماً، وهناك عدد كبير من القمم الأخرى التى تحتاج إلى فحص لمعرفة ما إذا كان هناك مشاكل محتملة "potential problem" مع الماكينات.

ولكن كيف يمكننا معرفة المستوى الذى يتعين عليه وضع حدود الإنذار "alarm limits"؟ من المتوقع أن بعض الأجزاء فى البصمة تكون أعلى من الأجزاء الأخرى.

العديد من الشركات المصنعة لجهاز جامع البيانات "data collector" توفر بعض هذه الحدود، وكذلك بعض حزم البرامج "software packages" بها حدود الإنذار أو التنبيه ولكن يجب أن نتأكد من أنها ملائمة للماكينات قبل إستخدامها.

لسنوات عديدة يوجد محاولات لتوصيف جميع الماكينات والتوصل إلى وضع مستويات للإهتزازات التى تحدد الكيفية التى تهتز بها الماكينات. ولقد بذلت محاولات من قبل بائعى البرامج وشركات التدريب وهيئة المعايير القياسية "standards bodies" على السواء.

وكانت النتيجة عبارة عن جداول من المستويات أو الحدود يعتمد أساساً على نوع الماكينة "machine type" (حجم الماكينة، الحمل، السرعة) والآتى بعض الجداول للرجوع إليها.

٢-٣-١- معايير شدة الإهتزازات رقم (2372/10816) "vibration severity criteria"

معيار الأيزو رقم 2372/10816 يوفر سعة الإهتزازات "vibration amplitude" كقيمة إرشادية مقبولة للماكينات التى سرعة تشغيلها من ١٠ إلى ٢٠٠ لفة/ثانية (٦٠٠ إلى ١٢٠٠٠ لفة/دقيقة).

فمثلاً معيار الأيزو يصنف الماكينات متوسطة الحجم "medium size" (١٥ إلى ٧٥ كيلووات) بأنها فى حالة جيدة "good" إذا كان المستوى العام للإهتزازات (rms) محصور بين ٠,١٨ إلى ١.١٢ ملليمتر/ثانية. الماكينات الكبيرة من الممكن أن تعمل بخشونة "rougher" مقارنةً بالماكينات الصغيرة التى من الممكن أن تعمل بنعومة "smoother".

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816

Vibration Velocity Vrms in/s	mm/s	Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
0.01	0.28	good	good	good	good
0.02	0.45	good	good	good	good
0.03	0.71	good	good	good	good
0.04	1.12	satisfactory	good	good	good
0.07	1.80	satisfactory	satisfactory	good	good
0.11	2.80	unsatisfactory	satisfactory	satisfactory	good
0.18	4.50	unsatisfactory	unsatisfactory	satisfactory	satisfactory
0.28	7.10	unacceptable	unsatisfactory	unsatisfactory	satisfactory
0.44	11.2	unacceptable	unacceptable	unsatisfactory	unsatisfactory
0.70	18.0	unacceptable	unacceptable	unacceptable	unsatisfactory
0.71	28.0	unacceptable	unacceptable	unacceptable	unacceptable
1.10	45.0	unacceptable	unacceptable	unacceptable	unacceptable

الفئة ١ "Class 1"

الماكينات صغيرة الحجم "Small machines" وخاصة المحركات الكهربائية التى تكون قدرتها أقل من ١٥ كيلوواط (٢٠ حصان).

الفئة ٢ "Class 2"

ماكينات متوسطة الحجم "Medium sized" وخاصة المحركات الكهربائية التى تكون قدرتها من ١٥ إلى ٧٥ كيلوواط (٢٠-١٠٠ حصان) وبدون أرضية خاصة "special foundations".

الفئة ٣ "Class 3"

الماكينات كبيرة الحجم "Large machines" أكبر من ٧٥ كيلووات والمثبتة على أرضية صلبة "rigid support".

الفئة ٤ "Clss 4"

ماكينات أكبر حجماً "Largest machines" أكبر من ٧٥ كيلووات والمثبتة على أرضية مرنة "felexible support".

إنظر إلى المفاتيح الآتية:–

الماكينة غير مقبولة ومطلوب إصلاحها "Unacceptable".

مستوى الإهتزازات فى حدود غير مسموحة وخطيرة "severe" بما فيه الكفاية ومن الممكن أن تقلل من عمر الماكينة، والإنهيار من الممكن أن يكون وشيكا ويوصى بالمراقبة المتكررة حتى إيقاف الماكينة "Frequent monitoring should be in place".

الرغبة فى إصلاح الماكينة لأن حالتها غير مرضية "unsatisfactory".

إستمرار الماكينة فى العمل ولكن الإصلاح أمر مرغوب فيه للمحافظة على عمر الماكينة. ويوصى بالمراقبة بشكل متكرر "Machine should be monitored more frequently" حتى إصلاح الماكينة.

الماكينة صالحة للإستخدام وحالتها مرضية "Satisfactory".

الماكينة فى حالة مرضية، وتراقب مراقبة روتينية "routine monitoring". وإذا كان مستوى الإهتزازات مرتفعاً قليلاً من خبرتك على الماكينة فالتحسين أمر مرغوب فيه.

الماكينة فى حاله جيدة "Good".

الماكينة تعمل بنعومة "Extremely smooth running machine" ومؤهله "Qualified" للعمل المتواصل.

٢–٤ حدود الإنذار المحسوبة "calculated alarm limits"

بدلاً من استخدام هذه الحدود الثابتة "fixed limits"، يمكننا محاولة حساب حدود الإنذار بناءاً على نتائج القراءات السابقة. ونرى أن جميع الماكينات مختلفة، حتى الماكينات المتشابهه " similar machines" (محركات التيار المتردد "AC motors" على سبيل المثال) ممكن أن تعمل بأحمال مختلفة، ومن الممكن تركيبها "mounted" بشكل مختلف، ومن الممكن تصنيعها بشكل مختلف، وهلم جرا، وبالتالى من الصعب إستخدام نفس حدود الإنذار الثابتة.

إذا أخذنا مجموعة من القراءات على الماكينة، وقمنا بإجراء تحليل لتقييم جودة تلك القراءات ووضع حالة تقريبية للماكينة، ففى هذه الحالة يمكننا تطبيق حدود الإنذار المحسوبة إعتماداً على المستوى الحالى للإهتزازات.

ونوصى بأن نبدأ البرنامج مع حدود الإنذار الثابتة "fixed alarm limits"، وبمرورالوقت وجمع عدد من القراءات الكافية يكون لدينا فكرة أفضل عن حالة الماكينة ونتحول إلى حدود الإنذار المحسوبة "calculated alarm limits". وباختصار، إذا كان مستوى الإهتزازات لم يتغير بأكثر من حوالى ١٥٪ خلال ستة أشهر فإن حالة الماكينة تكون مستقرة على الأرجح.

مستوى الإهتزازات من الممكن أن يتضاعف عن المستويات الأصلية الصحية أو المرجعية "original healthy levels". وبالتالى يمكننا مضاعفة مقدار مستوى القياس المرجعى وأخذه كقياس مرجعى.

ولكن ماهو القياس المرجعى أو الأساسى "baseline measurement"؟

القياس المرجعى وهو قياس مثالى يمثل الكيفية المثالية التى ينبغى أن تهتز بها الماكينة وهوالمقياس الذى يمكن مقارنته لتحديد مدى التغير الذى حدث. مع العلم بأن العديد من حزم البرامج تسمح بمقارنة بيانات الإهتزازات الحالية بالقياسات المرجعية بسهولة.

أبسط الأساليب هو أخذ المجموعة الأولى من البيانات التى تم جمعها سابقاً ووضعها "baseline" (كمرجع أساسى).

نهج آخر هو أخذ القياسات بعد الإصلاح أو بعد العمرة الجسيمة "repaired/overhauled" وبعد فترة تليين مناسبة "run-in". فى هذه الحالة من الممكن أن تعمل الماكينة بحالة جيدة ومستوى إهتزازها أفضل من أى وقت مضى. ويتم وضع حدود الإنذار الخاص بتلك الماكينة أكبر من ضعف المستوى المرجعى الأساسى "baseline" حتى لا يكون النظام حساساً جداً "too sensitive" مما يتيح إنذارات كاذبة "false alarms".

٢-٥- حدود الإنذار الإحصائية "Statistics"

والنهج المفضل لحساب المستوى المرجعى أو الأساسى هو إستخدام الحسابات الإحصائية. حيث يوجد أهمية لمعرفة القيم المطلقة لمستوى الإهتزازات ولكننا ربما أكثر إهتماما بمستوى التغير ومقداره.

إذا لم يتغير مستوى الإهتزازات على مدى فترة من الزمن، نرى أن الماكينة مستقرة "stable" ولا تحتاج إلى إصلاح. ويوجد كثير من الأمثلة التى شهدناها وسمعناها والتى تظهر إرتفاع غير مقبول فى مستوى الإهتزازات وتغير فى شكل البصمة ومع ذلك فإنها إستمرت على هذا الحال ولم تتغير

لمدة ١٨ شهر. وهذا لايعنى أن المشكلة غير موجودة ولكن يعنى فقط أنه غير مطلوب عمل إصلاح عاجل أو غير مخطط.

مثال:- إذا كان لدينا خمس مجموعات من القراءات أخذت منفصلة خلال ٣٠ يوماً. وإذا إفترضنا أننا فحصنا بصمة الإهتزازات ووجدنا أن قمة سرعة الدوران (X١) تغيرت تغيراً طفيفاً، في حين أن القمة عند (X٦) التى تتوافق مع الريش "vane pass" تغيرت بأكثر من ٣٠٪.

وإذا نظرنا إلى القياسات التالية، ماذا نتوقع أن نرى؟ نتوقع أن مستوى (X١) ستكون مماثلة للقراءات السابقة الأخرى، وقمة (X٦) التى كانت داخل الحدود "within the range" (أو ربما تقع خارجها قليلاً) سوف تزداد للقراءات الخمس السابقة.

لاحظ أننا لم نناقش المستويات المطلقة "absolute levels"، ولكن ناقشنا فقط المستويات النسبية "relative levels". وفي كثير من الحالات عندما يكون هناك سجل كبير من القراءات قد نصبح أقل اهتماماً بالمستويات المطلقة (أي قيمة المستوى الفعلي للإهتزازات ملم/ثانية).

ونعود مرة أخرى للمثال السابق، ماذا لو لاحظنا أن مستوى السعة (X١) كان أعلى بنسبة ١٠٪ عن المستوى السابق؟ سنكون مندهشين قليلاً لأن ذلك سيكون خارج الوضع الطبيعي للماكينة. ولا يكون من المستغرب لو زادت هذه النسبة ١٠٪ عند (X٦)، لأن مستوى الإهتزازات عندها يتغير من قياس إلى آخر.

هذه الملاحظات تعكس معيار التفاهم بين البشر. حيث أن الإحصاءات ليست سوى تطبيق لهذه الملاحظات ولكن في صيغ رياضية "mathematical formulas".

البارامیتر"parameter" الأول الذى نهتم به هو متوسط القيمة "average". إذا كان لدينا خمس قراءات عند (X١) ونجمع محصلة هذه القراءات ونقسمهم على خمسة، وبالتالى تكون القيمة الناتجة هى القيمة المتوسطة.

في هذا المثال، إننا نتوقع دائماً أن قيمة قراءة (X١) ستبقى دائماً حول القيمة المتوسطة " average value" – لأنها عادةً لا تتغير تغيراً كبيراً. ولا نتوقع أن قيمة (X٦) لن تكون قريبة دائماً من القيمة المتوسطة لأننا نعرف أنها تتغير على نطاق أوسع. وبالتالى نرى أن مقياس الإختلاف "variation" مهم بالنسبة لنا.

يمكننا حساب الإختلاف أوالتغيير بسهولة "variation"، وإذا تمكنا من حساب بارامیتر يسمى الانحراف المعياري "standard deviation". وهذا المصطلح يصف مقدار الاختلاف الطبيعي "normal" للكمية التي يجري قياسها.

و"الانحراف المعياري" عادةً مايرمز له بالرمز سيجما اليونانية σ "sigma". ومن الممكن أن نرى أن هناك إحتمالية كبيرة جداً "probability" أن القراءة الجديدة تقع ضمن ٣ سيجما، والإحتمالية الأقل أنها تقع داخل ٢ سيجما.

حساب الإنحراف المعيارى "standard deviation" لقراءات (X١)

دعونا نعود إلى المثال السابق لكى نوضح ما يعنيه ذلك. أولاً سوف نفحص قراءات (X١) الآتية (0.103, 0.104, 0.102, 0.096, 0.095).وبحساب القيمة المتوسطة 0.1 بوصة/ثانية للقراءات وبناءاً على جميع العينات السابقة تم حساب الانحراف المعياري "standard deviation" وكانت قيمته هى ٠.0042 (إنظر إلى طريقة الحساب الآتية).

ومع زيادة أو نقص سيجما واحدة (القيمة المتوسطة ± الإنحراف المعيارى) أى (0.1 ± ٠.0042) يكون مقدار الإهتزازات محصورة ما بين ٠,٠٩٥٨ إلى ٠,١٠٤٢ بوصة/ثانية.

كما ترون، ليست كل القراءات التى لدينا تقع ضمن هذا النطاق. ومع ذلك، ليس من المتوقع إحصائياً أن تكون داخل النطاق. ولكننا من الممكن أن نتوقع أن قراءات الاهتزاز تقع ضمن زيادة أو نقص ٢ سيجما من القيمة المتوسطة (0.1 ±٢ (٠.0042)). وفي هذه الحالة يكون مقدار الإهتزازات محصورة ما بين ٠,٠٩١٦ و ٠,١٠٨٤ بوصة/ثانية. وإذا وجدنا قراءة خارج هذا النطاق، فإننا نعتبرها غير عادية "unusual" وتستحق المزيد من التحليل.

حساب الإنحراف المعيارى "standard deviation" لقراءات (X٦)

وإذا قمنا بفحص البيانات الخاصة بالقمة (X٦). فستكون القيمة المتوسطة هى ٠,١٠٣٨ بوصة/ثانية للقراءات (0.107, 0.11, 0.092, 0.90 0.12). ويكون مقدار الانحراف المعياري " standard deviation" هو0.013 (أكبر من ٠.0042). وهذا يعنى أننا نتوقع أن القراءات تقع ضمن ٠,٠٧٧٨ إلى ٠,١٢٩٨ بوصة/ثانية (٢ سيجما).

لاحظ في المثال الثاني أن النطاق أو المدى كان من المتوقع "expected" أن يكون أكبر بكثير مما سبق. لأن مستوى الإهتزازات يتغير بشكل أكبر. مع إفتراض أننا كنا نراقب هذه المستويات ووافقنا على صحة هذا التغيير. ونود وضع حدود الإنذار التى تحذرنا عندما تزيد القراءة عن ما قد نعتبرة طبيعى "normal".

الخلاصة:-

إن أجهزة الكمبيوتر تمكننا من عمل كل هذا بكل سهولة. وإذا كانت حزمة البرامج تدعم ذلك، تكون مهمتك ببساطة هى مراجعة البيانات لتحدد أى من البيانات تكون مؤهله "worthy" لإستخدامها فى العملية الإحصائية "statistical process"، وبعد ذلك نطلب من البرنامج إنجاز العمليات الإحصائية.

والنتيجة هي أن حدود التنبيه والتى يتم إستخدامها، تعتمد أساساً على القراءات المأخوذة من على الماكينة وتأخذ بعين الاعتبار أن مستويات الاهتزاز عادةً ما تختلف.

وهذا الإختلاف عادةً ما ينشئ من عمليات الضوضاء (السريان "flow"، الضوضاء الخارجية، إلخ)، وتغير فى الحمل "fluctuations"، التغير الطبيعى فى الإهتزازات (أى إثنين من القياسات مؤخوذه بفارق دقيقتين عن بعضهما لن تكونا متشابهتان)، ومتغيرات التشغيل الأخرى.

التطبيقات الإحصائية تختلف من حزمة إلى أخرى، ولذلك إننا بحاجة للتشاور مع مورد البرنامج أو قراءة الدليل لمعرفة مدى الإستفادة من هذه الأداه القوية "powerful tool".

ويمكن القول بأن برنامج تحليل الإهتزازات يبدأ مع حدود الإنذار الثابتة (لعدم وجود بيانات سابقه لإستخدامها فى الحسابات)، وعندما يكون لدينا من خمس إلى عشرة قراءات (خمسة جيدة وعشرة يكون أفضل) يمكننا التحول إلى الطريقة الإحصائية.

٢-٥-١- معادلة حساب الإنحراف المعيارى "standard deviation"

حساب الإنحراف المعيارى لقراءات (X١) السابقة:-

$$\bar{x} = \frac{\sum \chi}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{\chi_1 + \chi_2 + \cdots + \chi_N}{N}$$

$$\bar{x} = \frac{0.103 + 0.104 + 0.102 + 0.096 + 0.095}{5}$$

$$\bar{x} = \frac{0.5}{5} = 0.1$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x)^2}{N - 1}}$$

$$\bar{x} - \chi_1 = 0.103 - 0.1 = 0.003$$
$$\bar{x} - \chi_2 = 0.104 - 0.1 = 0.004$$
$$\bar{x} - \chi_3 = 0.102 - 0.1 = 0.002$$
$$\bar{x} - \chi_4 = 0.096 - 0.1 = 0.004$$
$$\bar{x} - \chi_5 = 0.095 - 0.1 = 0.005$$

$$\sum (\bar{x} - x)^2 = (\bar{x} - \chi_1)^2 + (\bar{x} - \chi_2)^2 + (\bar{x} - \chi_3)^2 + (\bar{x} - \chi_4)^2 + (\bar{x} - \chi_5)^2$$

$$\sum (\bar{x} - x)^2 = (0.003)^2 + (0.004)^2 + (0.002)^2 + (0.004)^2 + (0.005)^2$$

$$\sum (\bar{x} - x)^2 = 0.000009 + 0.000016 + 0.000004 + 0.000016 + 0.000025$$

$$\sum (\bar{x} - x)^2 = 0.00007$$

$$N - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x)^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{0.00007}{4}} = \sqrt{0.0000175} = 0.00418$$

٢-٦- تطوير الاحصائيات "Statistics with a twist"

ناقشنا حتى الآن إستنتاج حدود الإنذار بإستخدام الحسابات الإحصائية على القراءات المأخوذة من على الماكينة. وعادةً ما نفترض أن القراءات المستخدمة فى الحسابات الإحصائية تأتى من مصدر واحد.

إذا كان لدينا ست وحدات (موتور - طلمبة) فى صف واحد، ونقوم بعمل الحسابات الإحصائية على كل واحدة من الوحدات الست، ماذا تتوقع لقراءات الإهتزازات عندما نقارنها بنقطة على رولمان البللى للوحدة "A" بنفس النقطة على الوحدة "B"؟

لو أن أنهما يعملان عند نفس الظروف (نفس الشركة المصنعة وتضخ نفس السائل) لاتتوقع أن مستوى الإهتزازات سيكون متشابه. وإذا كان هناك فرق فى مستوى الإهتزازات عند تردد أو آخر ربما إفترضت أنه يرجع لإختلاف ظروف التشغيل "different condition".

هل يمكننا معرفة حالة الطلمبة "A" من بيانات الطلمبة "B"؟ على سبيل المثال، وإذا راقبنا هذه الماكينات لمدة ٦ أشهر ورأيت إنهيار رولمان البللى للطلمبة "B"، ورأيت مستوى الإهتزازات التى وصلت إليه قبل الإنهيار فهل كل ذلك كان يساعدك على وضع حدود الإنذار على الطلمبة "A".

إذا كنت توافق على أن هذا الأمر منطقى، فربما أمكنك الإستفادة من بيانات ماكينات مماثلة "identical" متعددة لإنشاء إنذارات إحصائية لجميع تلك الماكينات.

ويمكن أن نأخذ هذا المفهوم خطوة إلى الأمام. ماذا لو وضعنا حدود إنذار ولاحظنا الوحدة "A" من خلال الوحدة "E" كانت OK فى حين الوحدة السادسة "F" بها مثلاً مشكلة ما.

ربما يمكننا أن نبنى حدود الإنذار إستناداً إلى البيانات المتاحة على الطلمبات الخمسة الأولى وعمل العمليات الحسابية لحساب حدود الإنذار للوحدات الخمس الأولى (إذا إفترضنا قياس الخمس وحدات من الطلمبات مرتين فسيكون لدينا عشر مجموعات من البيانات وهى كافية لحساب حدود الإنذار)، وفى هذه الحالة يمكننا تطبيق حدود الإنذار للوحدات الخمس الأولى على جميع الوحدات بما فيهم الوحدة السادسة "F".

وإذا فعلنا ذلك فإننا نسلط الضوء على الطلمبة "F" لمعرفة مدى حقيقة حدية حالتها، وسيكون لدينا مرجعية جيدة للمقارنة.

ليس كل حزم البرامج تدعم هذه الحسابات الإحصائية (التى تستخدم بيانات الإهتزازات لماكينات متعددة)، وبالتالى تحتاج إلى معرفة وجود هذه الخاصية فى البرامج التى تستخدمها. والفائدة هى أن تتمكن بسرعة من بناء حدود إنذار مدروسه، والتى تمكنك من تسليط الضوء على شدة الحالة لإحدى الماكينات فى المجموعة بناءًا على البيانات الأخرى من باقى المجموعة.

هذه التقنية تستخدم أيضاً بمثابة تذكير عند عمل تحليل للإهتزازات، حيث ينبغى فحص بيانات الماكينات المماثلة الأخرى من أجل تحديد طبيعة وشدة المشكلة – لأننا دائماً نجد صعوبة فى معرفة الحالة "الطبيعية" للماكينة "normal".

٢-٧- أساليب كشف المشاكل بإستخدام حزم البرامج

قد رأينا كيف أمكننا إستخدام حدود الإنذار الثابتة والإحصائية لحساب القيم التى يمكن تطبيقها على حدود الإهتزازات. ولكن كيف يتم تطبيقها؟

وسيتم تطبيقها من خلال حزم البرامج المستخدمة والتى تشتمل على كل من نطاق الإنذار " Band alarms"، الإنذار المغلف "envelope alarms"، النظم الخبيرة "expert systems" ونظم الذكاء الإصطناعى "artificial intelligence systems". وسيتم تلخيص كل منهم.

٢-٧-١- نطاق الإنذار "Band alarms"

نطاق الإنذار وهى إحدى المجالات المستخدمة بشكل كبير من خلال حزم البرامج المستخدمة.

ويعمل نطاق الإنذار ببساطة على مبدأ تقسيم البصمة إلى أجزاء مختلفة بالإضافة إلى قياسات عددية مختلفة (قراءات المستوى العام، قياسات رولمان البللى، إلخ) وتطبيق إنذارات مختلفة لكل نطاق.

على سبيل المثال، نأخذ البصمة ونحدد نطاق واحد حول قمة سرعة الدوران. ويركز البرنامج على مستوى الإهتزازات مثلاً بين ٠,٩ X إلى ١,١ X. ويقوم البرنامج بالنظر إلى الإهتزازات فى نطاق التردد المحدد ويحسب الحد الأقصى، الحد المتوسط، مربع الجذر التربيعى "rms level"، أو بعض البارامترات الأخرى ومعرفة ما إذا كانت تجاوزت الحدود المسموحة.

ويتم تطبيق نفس الإسلوب أيضاً على البيانات العددية "scalar" مثل قراءات المستوى العام "overall readings" وقراءات الشكل الموجى "waveform" من القمة إلى القمة "pk-pk"، وحسابات معامل كريست "crest factor"، قياسات رولمان البللى أو بعض البارامترات الأخرى المفيدة.

ويمكن إعطاء النطاق "band" إسم خاص، على سبيل المثال "X١"، قمة سرعة الدوران " Running speed peak" أوعدم الإتزان "Imbalance" أو تبعاً لما يفضل المستخدم. والحدود المطبقة "limits" هى أيضاً من إختيار المستخدم وهى إما حدود إنذار ثابتة أو الحدود الإحصائية المحسوبة.

ومن الشائع أيضاً أن للمستخدم القدرة على وضع أكثر من حد "limits" لكل نطاق "band" وعلى سبيل المثال التحذير"alert" والخلل "fault".

ستة أو إثنى عشر نطاق "bands" متوفرة للإستخدام فى هذه الطريقة (العدد الدقيق متاح من خلال حزمة البرامج)، ويمكن أن يغطى النطاق مدى ترددات ضيقة "narrow frequency ranges"

(X١، X١، X٣، الخ) أو نطاقات أوسع "broader ranges" ١ – X٠,١٠ ، X٠,٢٥ – X ٠,٨ نسبة من سرعة الدوران (sub-synchronous)، X١٠ – X٥٠ وهلم جرا.

بطبيعة الحال الخيارات تختلف من حزمة برامج إلى أخرى والإسم الذى يطلق على هذه النطاقات تختلف أيضاً.

عند إنشاء التقرير الإستثنائى "exception report"، البرنامج يقوم بعمل الحسابات اللازمة لإستخراج أول قيمة من النطاق "band"، ثم مقارنة تلك القيمة بحدود الإنذار. ويتم إخراج التقرير لتنبيه المستخدم بأى تغيرات.

في النظم التي تم إعدادها بشكل صحيح، يقوم التقرير بحصر عدد صغير من الماكينات، والمعلومات التى يحتويها التقرير يجب أن تعطي مؤشراً واضحاً على حالة الماكينة. وقد تم خلال السنوات الماضية تحسين أداء التقارير والأساليب المستخدمة لإستنتاج حدود الإنذار.

ولكن، للأسف الجهد والمهارة والخبرة والصبر مطلوب لإعداد "set up" النطاقات بالشكل الصحيح "bands" (أو مجموعة بارامترات التحليل "analysis parameter") والتقرير يتضمن العديد من الماكينات، وإذا كان ظهر أكثر من ثلث الماكينات فى التقرير فإنك لم تقم بإعداد النظام بالشكل الصحيح.

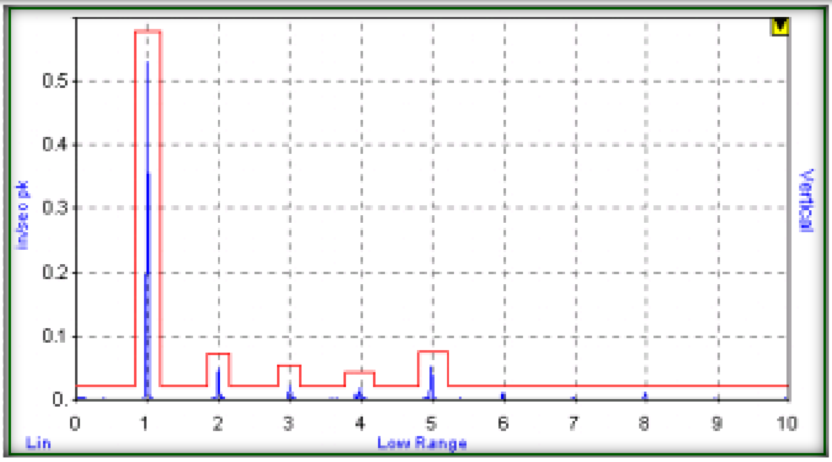
هذا الأمر كثيراً ما تسبب فى إحباط مهندسي تحليل الاهتزاز واللجوء إلى التحليل اليدوي بدلاً من ذلك. ولحسن الحظ فإن النطاقات يمكن إستخدامها كأداه مفيدة فى تحليل الإهتزازات، والبيانات المستخرجة من النطاقات يمكن إستخدامها فى منحنى الطور"trend"، ولكى تمكننا من معرفة تغير البيانات مع مرور الوقت.

ويجب أن تعلم أن هناك قيمة كبيرة في تشغيل التقارير الإستثنائية "exception reports". وعندما يعمل بالشكل الصحيح فإنه يوفر الوقت والجهد. ومجرد تفريغ البيانات "unload" المأخوذة على جهاز جامع البيانات، وتشغيل التقرير وعرض قائمة الماكينات التى دخلت حدود الإنذار " in alarm" وبالتالى تستغل وقتك بالإهتمام فقط بالماكينات التى بها المشاكل.

٢-٧-٢ الإنذار المغلف "envelope/mask alarms"

الإنذار المغلف (المعروف أيضاً باسم قناع الإنذار، وينبغي عدم الخلط بينه وبين الكشف المغلف "envelope detection" الذى يستخدم في تحليل رولمان البللى)، ويتخذ نهج مختلف حيث بدلاً من تقسيم البصمة إلى نطاقات مختلفة فإنة يطبق حدود الإنذار على كامل بصمة الإهتزازات.

كما في هذا المثال، فليس خط مفرد "single line" في كل أنحاء البصمة ولكن بدلاً من ذلك فإنه غلاف "envelope" يحتضن البصمة عند كل الترددات.



فائدة هذا الإسلوب أنه يتم تغطية كل الترددات، وأنه أكثر حساسية للقمم "peaks" التي يمكن أن تظهر على ترددات غير متوقعة. في حين أن النطاق الواحد "single band" من الممكن أن يستخدم لتغطية مدى واسع من التردد، من X١ إلي X١٠ وذلك على سبيل المثال، قد يتم حساب الإنذار المغلف "envelope/mask alarms" ليشمل ما يصل إلي ٥٠ حد من حدود الإنذار التى تتبع شكل البصمة.

٢-٧-٣- النظم الخبيرة "Expert systems" ونظم الذكاء الاصطناعي "Artificial intelligence"

هناك فروق رئيسية بين الطرق التقليدية والمبنية على أساس النظم الخبيرة لمعالجة المعلومات وتلك التى تتبعها الشبكات العصبية الإصطناعية .

فالنظم الخبيرة ما زالت محصورة فى عمليات المعالجة المتتابعة "Sequential processing" والتى تعتمد أساساً على صياغة الخبرة البشرية فى تحليل وتشخيص مشاكل المعدات فى صورة قواعد معينة ثابتة "rules" لا تتغير وتعتمد على خبرة واضع هذه القواعد "مثل" إذا كان تردد سرعة الدوران X١ عالى فى الإتجاه الرأسى والأفقى وليست عالية فى الإتجاه المحورى والإهتزازات عند X٢ ليست عالية، فإن المشكلة تكون عدم الإتزان.

ولقد أثبتت الممارسة العملية أن عملية تشخيص مشاكل المعدات تتطلب عدداً هائلاً من تلك القواعد وهو أمر ليس يسيراً ويستهلك وقتاً طويلاً يقضيه مصمم النظام الخبير فى دراسة وتفهم كافة الإحتمالات الممكنة التى قد تتسبب فى تعطل الماكينة هذا بالإضافة إلى عجز تلك النظم على إكتشاف الملامح التى تميز أسباب العطل.

أما برامج الشبكات العصبية الإصطناعية فإنها تستخدم نظام المعالجة المتوازية " Prallel processing" وتتبع فى حلها مشاكل الإهتزازات أسلوباً يختلف تماماً عن الأسلوب التقليدى.

فبعد بناء الشبكة العصبية الإصطناعية بإستخدام المعدات "Hardware" وبرمجتها "Software" بأسلوب المحاكاه "Simulation" يبدأ تعليمها "learn" تمييز وتصنيف بصمات المعدات فى الظروف المختلفة للتشغيل.

والأمر المثير هنا أن نفس الشبكة يمكنها تعلم المزيد من أشكال بصمات المعدات وهى بذلك تتمتع بقدر كبير من المرونة يفتقدها البرنامج المصمم طبقاً للأسلوب التقليدى .

أما الأمر المثير الآخر فهو مقدرة الشبكة العصبية الإصطناعية على إستخلاص الملامح المميزة لبصمات المعدات بنفسها وبدون عون أو تدخل مباشر من الإنسان والتعرف على مشاكل الماكينات بسرعه وبدقة وبدون معرفه مسبقه وفى غيبة البيانات الدقيقة والكاملة.

٢-٧-٤- تأثير تغير السرعة "speed variation" على حدود الإنذار

من الممكن أن يسبب لنا تغير كل من السرعة والحمل للماكينات قدراً كبيراً من المشاكل. ويجب أن نعرف من الآن أن القاعدة الأساسية فى إختبار الماكينات الدوارة هو تكرار الإختبار (القياس) عند نفس ظروف التشغيل "repeatable test conditions". ويجب أن نفعل كل ما فى وسعنا لضمان عمل الماكينة فى كل مرة عند نفس السرعة والحمل.

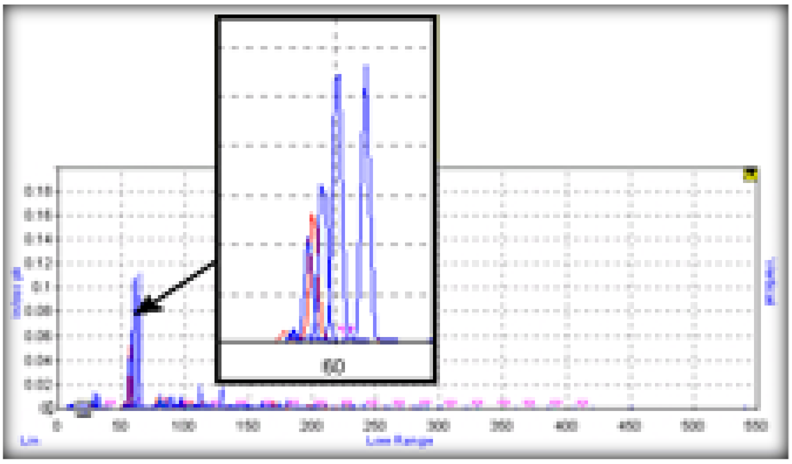
وإذا لم نستطع فعل ذلك فيجب أخذ إجراءات للتعامل مع قاعدة بيانات المعدات بشكل مختلف حتى نصل إلى النتائج الصحيحة.

ناقشنا سابقاً إنشاء نطاق حول قمة سرعة التشغيل، من X٠,٩ إلى X١,١ على سبيل المثال. ولكن ماذا يحدث عند تغير السرعة؟ ماذا يعني النطاق فى حقيقة الأمر؟ عندما تتغير سرعة الماكينة (أو عندما يتغير الحمل)، فإن مستوى الإهتزازات "vibration levels" تتغير تبعاً لذلك. وإذا تغيرت السرعة بما فيه الكفاية فإنها تؤثر بشكل كبيرعلى مستوى السعة "amplitude level".

والسؤال هو ماذا لو وضعنا حدود للإنذار؟ هل سيبقى مستوى الإنذار مؤثراً وسارى المفعول؟ هل القمة X١ فى بصمة الإهتزازات مازالت واقعة داخل النطاق "band"؟

عليك أن تكون قادراً على الإجابة على هذا السؤال بغض النظر عن الطريقة التي تستخدمها (النطاقات، الإنذار المغلف، النظم الخبيرة أو نظم الذكاء الاصطناعي).

واذا كان لدينا بصمات إهتزاز لماكينة تعمل بسرعات مختلفة فإننا نتوقع أن نرى قمم في أماكن مختلفة كما فى البصمة التالية.



قضية أخرى أكثر أهمية هو هل مدى التغير فى السرعة مناسب ويمكن التعامل معه؟ إذا كانت الماكينة تتغير سرعتها بنسبة مئوية قليلة أو أكثر من ذلك أو أقل فإننا يمكننا فى هذه الحالة تطبييع "normalize" بصمة الإهتزازات. وخارج هذا النطاق أو المدى فمن المحتمل أن يختلف مستوى الإهتزازات نتيجه كل من (الرنين، قوه الصدمات "impacts"، تغير الحمل وعوامل أخرى) وبالتالى التطبيع غير مناسب.

هناك عدد قليل من الأساليب المختلفة التي يمكن أن تتخذ للتعامل مع تغير السرعة، وهى تعتمد على النظام الذى نستخدمه. وفى بعض الحالات من الممكن ان تقرر أن تختار بين تقسيم الماكينات تبعاً لنطاق التشغيل (سرعة التشغيل) أو إعداد الماكينات بأسماء مختلفة فى قاعدة البيانات لتخزين القياسات عند إختبارها فى ظروف التشغيل المختلفة.

على سبيل المثال، قد يكون لديك عدد ٢ ماكينة فى قاعدة البيانات تسمى "Chiller A summer" و "Chiller A winter". ففى فصل الصيف عندما يعمل المبرد عند أكبر حمل يتم جمع البيانات الخاصة بالمبرد المسمى "Chiller A summer". وفى الشتاء عندما يعمل المبرد عند حمل ومستويات منخفضة يتم جمع البيانات الخاصة بالماكينة "Chiller A winter".

ونفس الطريقة، قد يكون لدينا "Pump A 1000 RPM"، "Pump A 1200 RPM"، وهلم جرا. إذا كنا لانستطيع التحكم فى سرعة الدوران للماكينة، فقد نضطر إلى تخزين البيانات فى "ماكينات" مختلفة فى قاعدة البيانات، وتطبيق حدود إنذار "alarm limits" مختلفة لكل ماكينة.

هذه محاولات لوصف الماكينة بحيث يمكننا تطبيع تأثير تغير كل من السرعة والحمل.

ومع ذلك، فإن الهدف الأول هو التحكم فى السرعة والحمل للماكينات إذا كان ذلك ممكناً. والهدف الثانى هو التقليل فى إختلافات السرعة بحيث يمكننا مقارنة البيانات لجميع القياسات. وأخيراً، إذا كان ذلك غير ممكناً، نحن فى حاجة إلى إعداد النظام الذى نستخدمه بحيث يمكننا الإحتفاظ بالبيانات وحدود الإنذار كلٍ على حده (منفصلين).

٣- ملخص مرحلة الكشف "detection phase"

يوجد أكثر من طريقة لإستنتاج حدود الإنذار، ويوجد عدد من الأساليب المتاحة للكشف عن الماكينات التي بها مشاكل أتوماتيكياً. كما هو الحال مع كل جانب من جوانب الحياه، إذا كنت على استعداد لاستثمار بعض الوقت فسوف تحصل على نتائج أفضل، وسوف تجني ثمار تحسين الكفاءة.

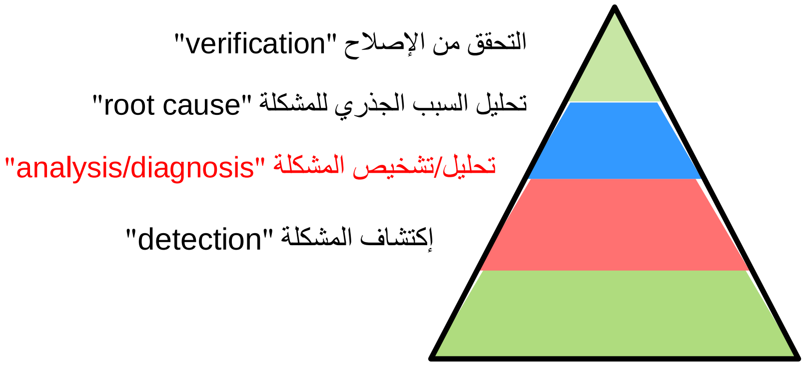
والمطلوب هو أن تبدأ المشوار، ما لم يتم استخدام نظام خبير جيد، فلن تتمكن من معرفة أى من الماكينات تعطى دلائل ومؤشرات أولية لوجود مشكلة. وفى أحسن الأحوال التقرير الإستثنائى سوف يعطيك بعض الأدلة على طبيعة وخطورة المشكلة.

والمطلوب منك بعد ذلك الإنتقال إلى الخطوة التالية وهى عملية التحليل "analysis process" بأن تبدأ أولاً بإستبعاد الماكينات التى ليست بها أى مشاكل، وثانياً وهو الأهم تحديد طبيعة وشدة المشكلة.

القسم الرابع:- مرحلة تحليل/تشخيص المشكلة "analysis/diagnosis"

مقدمه:-

وبمجرد الانتهاء من مرحلة إكتشاف المشكلة وإخراج قائمة بالماكينات التى بها مشاكل، تبدأ مرحلة تحليل وتشخيص المشكلة "analysis/diagnosis" وهذا يتطلب تحليل دقيق لبيانات الإهتزازات "vibration data" والتى تشمل تحليل كلٍ من بصمة الإهتزازات "spectrum" والشكل الموجى "time waveform" ومنحنى الإطراد "Trend Plot" وفحص جميع الأنماط "patterns" الموجودة بالبصمة ومقارنة القراءات الحالية بالقراءات السابقة ومقارنة البيانات بنقط أخرى على الماكينة، وحتى نقاط أخرى على ماكينات متماثلة "identical" لمعرفة طبيعة وشدة المشكلة "nature وseverity".



١- المرحلة الثانية :- تحليل/تشخيص المشكلة "analysis/diagnosis"

وتسمى هذه المرحلة مرحلة تحليل وتشخيص المشكلة "analysis/diagnosis phase" وفيها يتم فحص بصمة الإهتزازات بالبحث عن أنماط تقليدية "classic patterns" مثل التردد وتوافقاتها "harmonics" والترددات الجانبية "sidebands"، والمطبات "humps" ... إلخ. والبحث عن مشاكل أخرى محددة مثل عدم الإتزان، عدم السنترة ومشاكل رولمان البللى، إلخ.



يمكن أن تشتمل مرحلة التحليل "analysis phase" على إختبارات إضافية والتي يمكن إجرائها بشكل روتيني. وهذه الإختبارات يمكن أن تشمل قياسات زاوية الطور، إختبارات الرنين، وإختبارات أخرى متخصصة.

وفى مرحلة التحليل "analysis phase" يمكن أن تشمل أيضاً إستخدام الوسائل الأخرى لمراقبة حالة الماكينات "condition monitoring" مثل تحليل الزيوت "oil analysis"، تحليل تآكل الجسيمات "wear particle"، والكاميرا الحرارية، وإلخ.

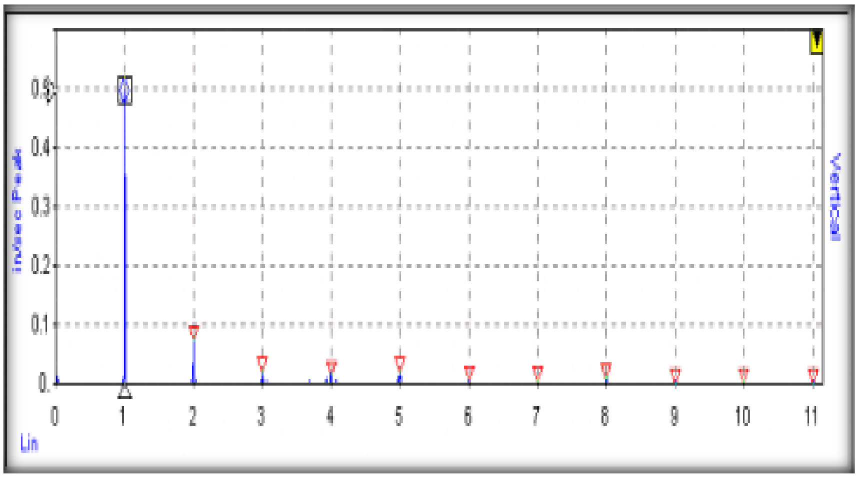
وفى النهاية يتم عمل تقرير مفصل بحالة الماكينة لإدارة الصيانة لإجراء الصيانة اللازمة تبعاً للتوصيات الموصى بها.

١-١- التحقق من صحة البيانات الملتقطة "validate the data"

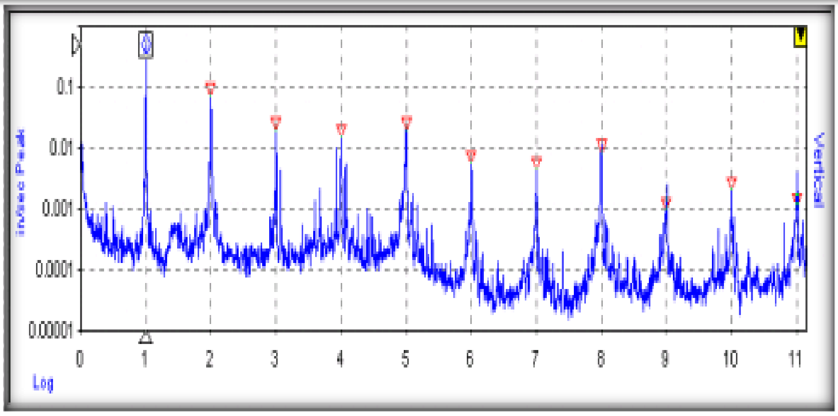
ويتطلب فحص بصمة الإهتزازات، التأكد من صحة البيانات الملتقطة "validate the data" قبل القفز إلى أى إستنتاجات وهذا ربما ينقذك من أخذ قرارات خاطئة تسبب لك الحرج فى وقت لاحق. هناك إحتمالات كثيرة من الأخطاء ممكن أن تحدث عند أخذ قياسات الإهتزازات منها تفكك لاقط قياس الإهتزازات "loose transducer"، تحرك "surge" الماكينة فى منتصف القياس"mid-test"، أخطاء فى ظروف التشغيل، وأكثر من ذلك. (إنظر إلى الباب الرابع القسم الثانى بند رقم (٧).

١-٢- تحليل التوافقات "Analyzing Harmonics"

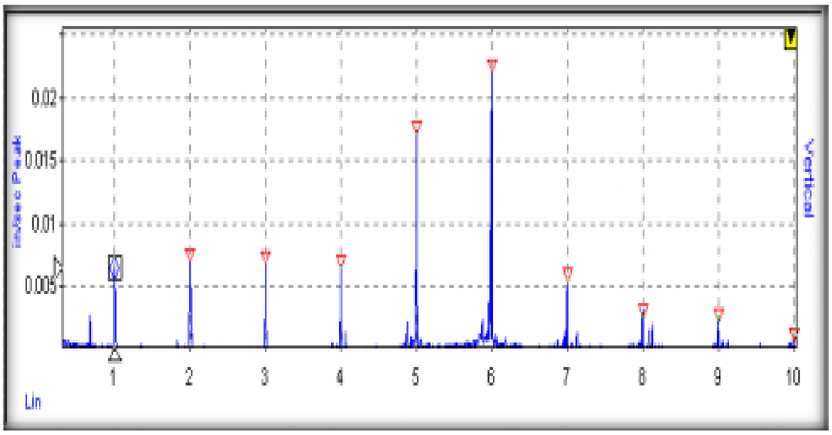
التوافقات "Harmonics" هى واحدة من الأنماط "patterns" الأكثر شيوعاً. والتوافقات عبارة عن سلسلة من القمم "peaks" بدءاً من الترددات الأساسية "fundamental frequency". فى هذا المثال لدينا قمة عند سرعة الدوران والتى حدثت عند ٣٥٨٧ CPM.



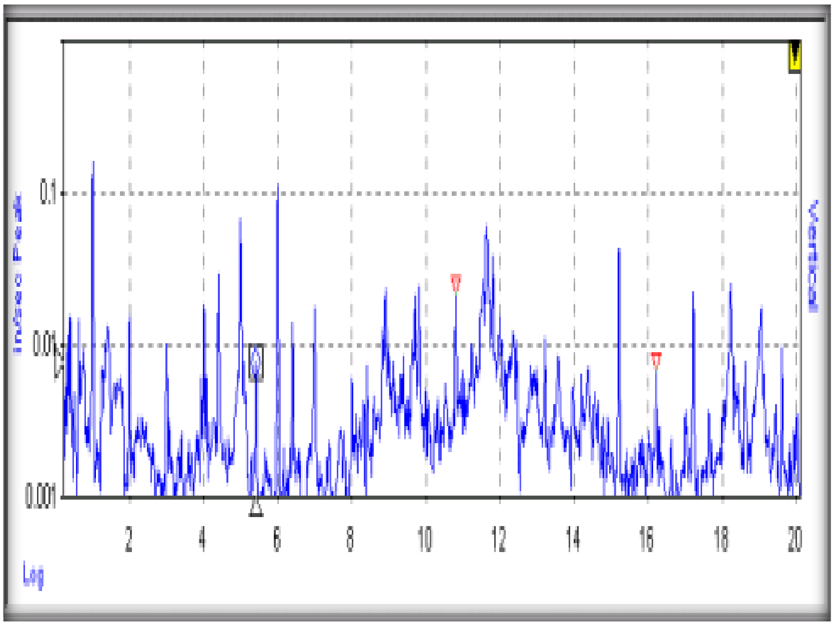
التوافقيات واضحة، ولكن إذا غيرنا البصمة لتصبح بالمقياس اللوغاريتمى "logarithmic scale" فإنها ستصبح أكثر وضوحاً.



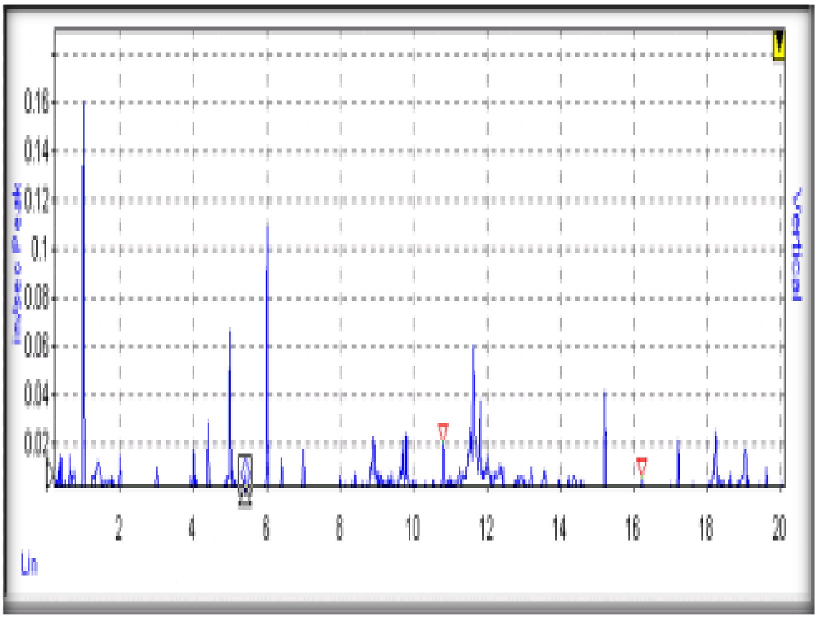
فى بعض الأحيان من الممكن لبعض التوافقات أن تكوب بسعة أعلى "higher amplitudes" من التردد الأساسى "fundamental frequency" كما فى هذه الحالة.



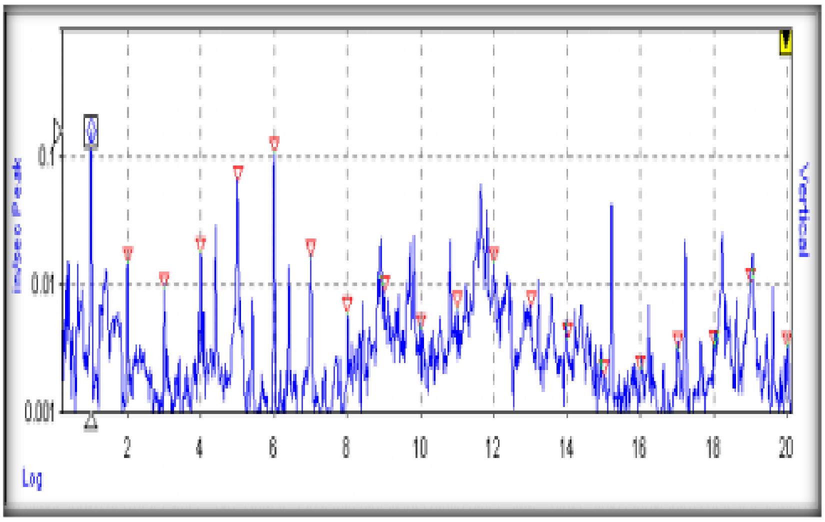
أحياناً تكون التوافقات ليست من سرعة الدوران (كما يحدث فى التفكك "looseness") ولكنها ممكن أن تنسب إلى رنين البللى "bearing tone" أو السيور أو ترددات أخرى. وهنا يمكننا أن نرى التوافقات المحتملة لرولمان البللى.



مره أخرى فإنه من الصعب أن نرى هذه التوافقات بإستخدام المقياس الخطى "linear scale".

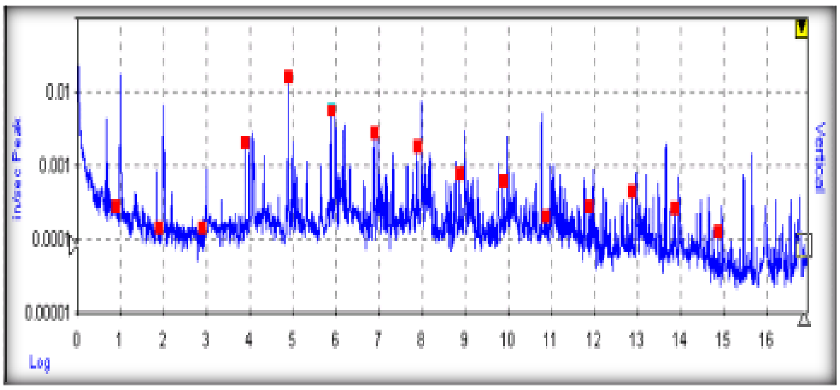


هذه البصمة تحتوى أيضاً على توافقات X۱ .

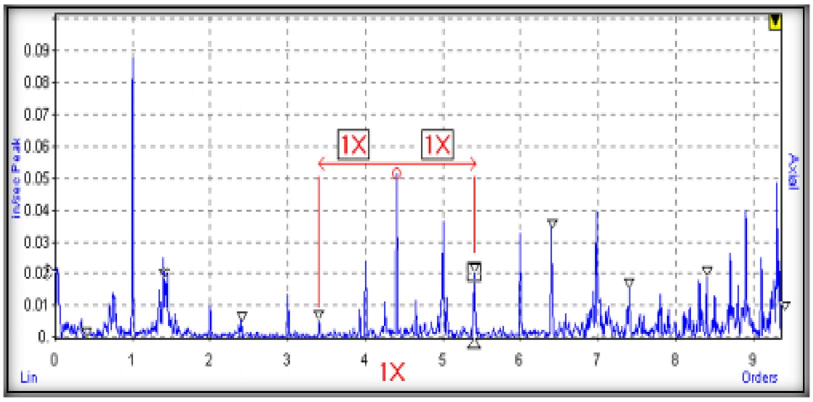


١-٣- تحليل الترددات الجانبية "Analyzing Sidebands"

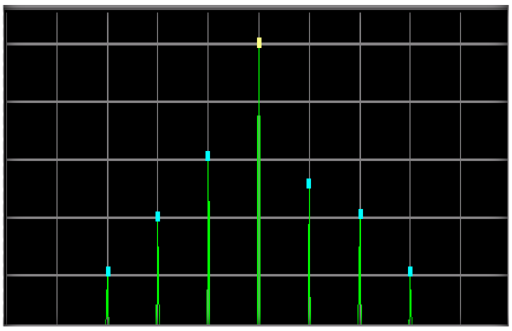
الترددات الجانبية "sidebands" هي أيضاً ظاهرة مهمة جداً للمساعدة على تحليل الإهتزازات فى الماكينات الدوارة.



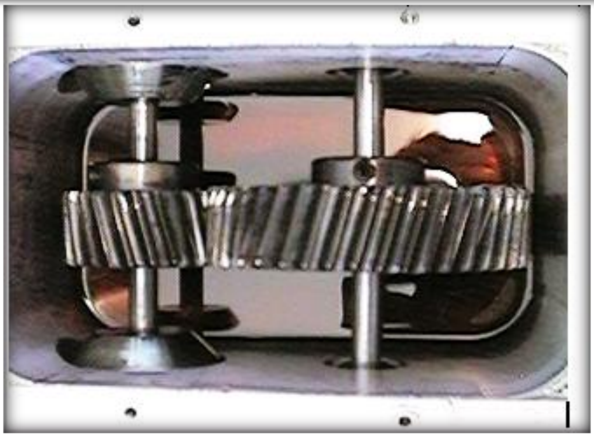
وجود توافقات لترددات مصحوبة بترددات على جانبيها والمعروفة "sidebands". والتي تحدث نتيجة تحويرالسعة "amplitude modulation" بين إشارتين حيث تتغير سعة إحدى الترددات بصفة دورية نتيجة تغير الأحمال فتتولد أعلى سعة عندما يكون الجزء الدوار واقع فى منطقة الحمل "load zone" وتقل السعة وتصل إلى أقل قيمة عندما يكون الجزء الدوار خارج منطقة الحمل " out of load zone". ويظهر ذلك بوضوح فى رولمان البللى وصندوق التروس والمشاكل الكهربية وبعض المشاكل الأخرى.



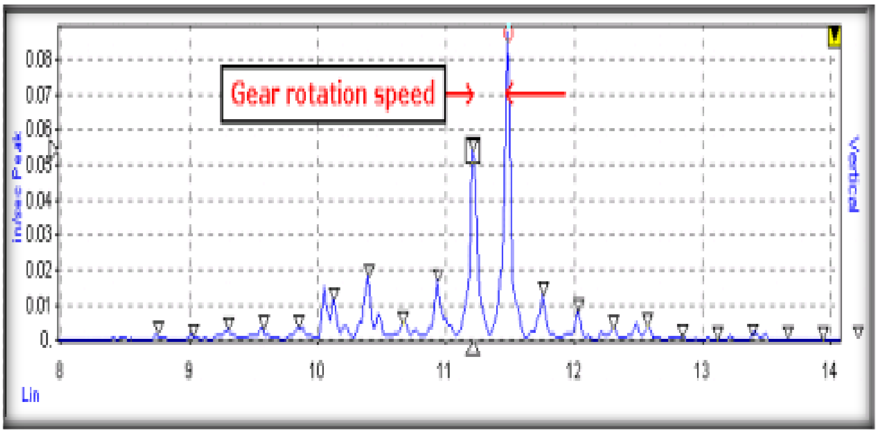
فى البصمة، الترددات الجانبية "sidebands" تبدو قمم متباعدة بشكل متساوى وتتمحور حول "centered around" قمة أخرى أساسية تسمى مركز التردد "center frequency". ويتوقف تحليل كل جزء إعتماداً على المشكلة نفسها وقد نكون مهتمين بمركز التردد "center frequency" أو القمم المتباعدة بشكل متساوى على جانبى مركز التردد "sidebands" أو كليهما.



دعونا نلقى نظرة على مثالين. الأول من صندوق التروس. البصمة تظهر "تحويرتعشيق التروس" "gearmesh modulation". يمكننا أن نرى مركز التردد "center frequency" عند تردد تعشيق التروس (وهى عبارة عن عدد الأسنان فى سرعة دوران عمود الترس"pinion") ويتمحور حولها "centered around" قمم أخرى من سرعة دوران الترس نفسه تسمى "sidebands".

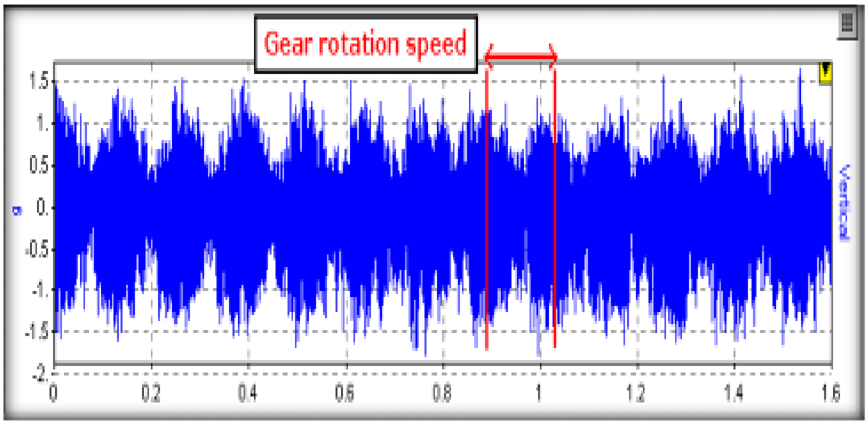


إذا نظرت إلى بصمة الإهتزازات عن قرب سوف ترى هذه المجموعة من الترددات الجانبية "sidebands".

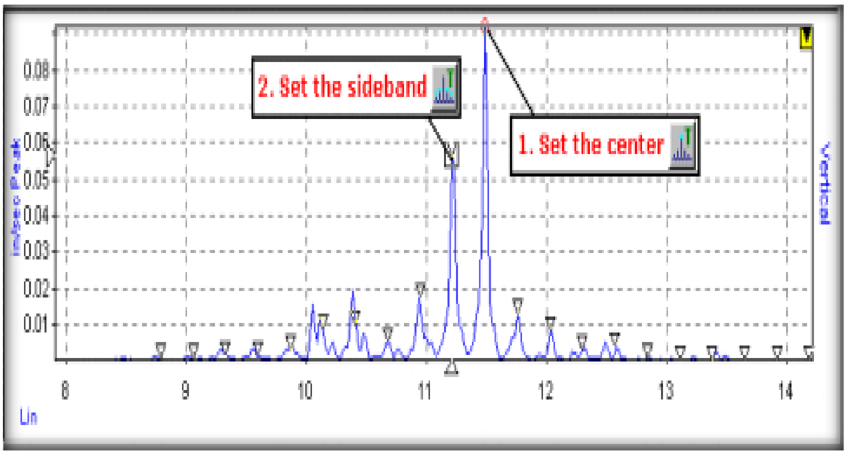


في هذه المرحلة نحن لسنا بحاجة لبعض الحسابات الرياضية للمعلومات الخاصة بصندوق التروس. ولكن النقطة الأساسية هو فحص بصمة الإهتزازات وتحديد أولاً مركز التردد " center frequency" ثم تحديد مسافات التباعد الجانبي "sidebands".

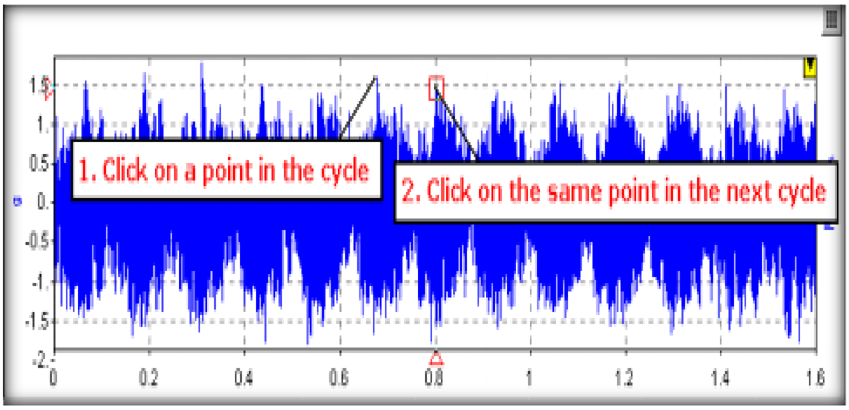
إذا نظرنا سريعاً إلى الشكل الموجي "time waveform" يمكننا أن نرى علامات كلاسيكية من تحوير السعة "amplitude modulation". مستوى السعة تتذبذب "pulsating" عند تحوير التردد "modulated frequency" لسرعة دوران العمود.



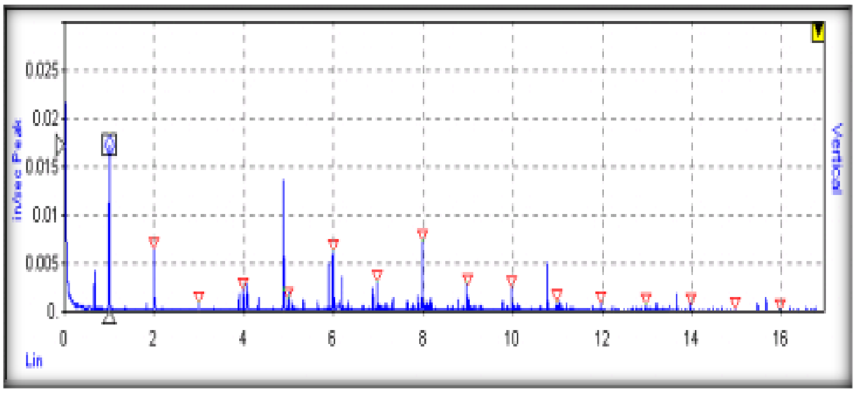
يمكنك التكبير فى بصمة الإهتزازات حول القمة X١١، ووضع المؤشر عند التردد المركزى "center frequency" ثم ضع علامة على مسافات التباعد الجانبى "sidebands" وحرك المؤشر لضبط التردد الجانبى وتثبيته عندها. سوف ترى قراءة المؤشر X٠,٢٧.



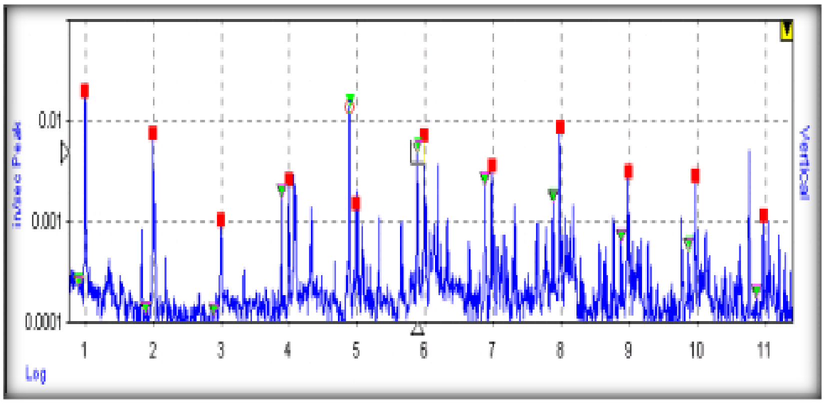
أيضاً عند تحليل بيانات الشكل الموجى، إذا نقرت على قمة واحدة "one peak" فى الزمن الموجى، وانقر على القمة التالية فى الدورة التالية "next cycle"، قراءة المؤشر سوف تحسب الفرق الزمنى بين النقطتين، ومنها يتم حساب التردد. مرة أخرى سوف ترى القراءة X٠,٢٧.



الآن دعونا نلقي نظرة على مثال آخر. هذه المرة لدينا بيانات من ماكينة بها مشكلة فى الجلبة الداخلية لرولمان البلي "inner race". يمكننا أن نرى سلسلة قوية من توافقات X١.



سوف نلاحظ أن البيانات لها قمة كبيرة "large peak" عند X٤,٩. وإذا وضعنا هذه القيمة كما لو كانت تردد مركزى "center frequency" وقمنا بوضع علامة على مسافات التباعد الجانبى "sidebands" عند X١ (أو إختيار نظام التباعد الجانبى "sidebands" والنقر على قمة X٥,٩) سوف ترى سلسلة قوية من التباعد الجانبى "sidebands". ملحوظه للتوضيح أكثر قمنا بتكبير البصمة وذلك بإستبدالها من المقياس الخطى إلى المقياس اللوغاريتمى.



يمكننا أن نذهب أبعد من ذلك مع هذه البيانات، كما أمكنك أن ترى بوضوح أن هناك قمم أخرى لم تمثل فى هذا المثال. ولكن ليس هذا هو الهدف من ذلك التمرين. تعلمنا كيفية تحديد وتحليل التباعد الجانبى "sidebands"، وتعلمنا أهمية فهم التحوير "modulation".

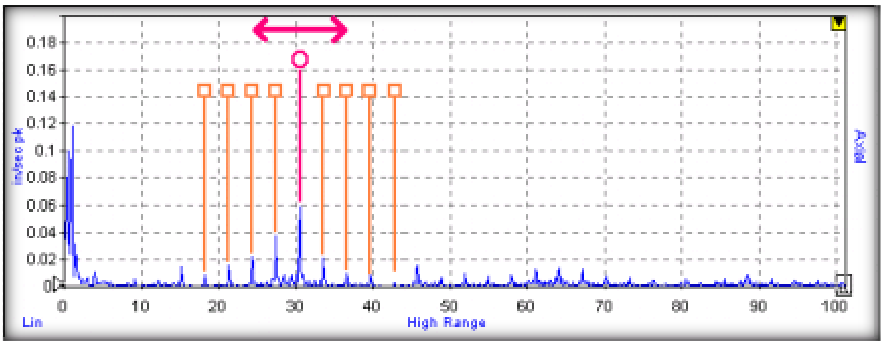
يوجد نهجين "approaches" لتحليل الترددات الجانبية "sidebands"

من النقط الهامة هو دراسة الترددات الجانبية "sidebands" ومعرفة ما نبحث عنه (مركز التردد أوالترددات الجانبية)، ونحاول تحديد المسئول عن القمم فى بصمة الإهتزازات ومعرفة ما إذا كان التحوير "modulation" هو المسئول عنها.

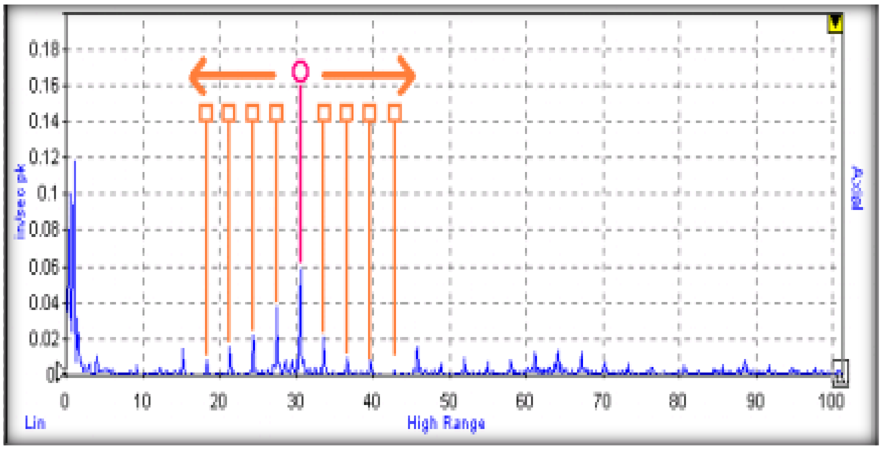
على سبيل المثال، إننا مهتمون بالترددات الجانبية "sidebands" حول تردد تعشيق التروس "gearmesh frequency". لأنه إذا ظهرت "sidebands" فمعنى ذلك أن الأسنان أصبحت متآكلة. فى هذه الحالة نحن نعرف ماذا نبحث عنه. والسؤال الوحيد هو ما إذا كان هذه "sidebands" ناتجة من السرعة الداخلة للعمود أوالخارجة منه "input or output shaft speed".

فى بعض الأحيان ننظر إلى بصمة الإهتزازات ونتعرف على وجود الترددات الجانبية "sidebands" ونحن قد لا نتوقع أن يحدث تحوير "modulation". ولكن فى الماكينات المعقدة التى تحتوى على صندوق تروس متعدد المراحل "multistage gearboxes"، السيور "belts"، رولمان البللى، ويمكن أن يكون هناك مصادر أخرى للتحوير "modulation" – وبالتالى نحن بحاجة إلى التعرف عليه ومحاولة إستخدام هذه المعلومات فى التشخيص "diagnosis".

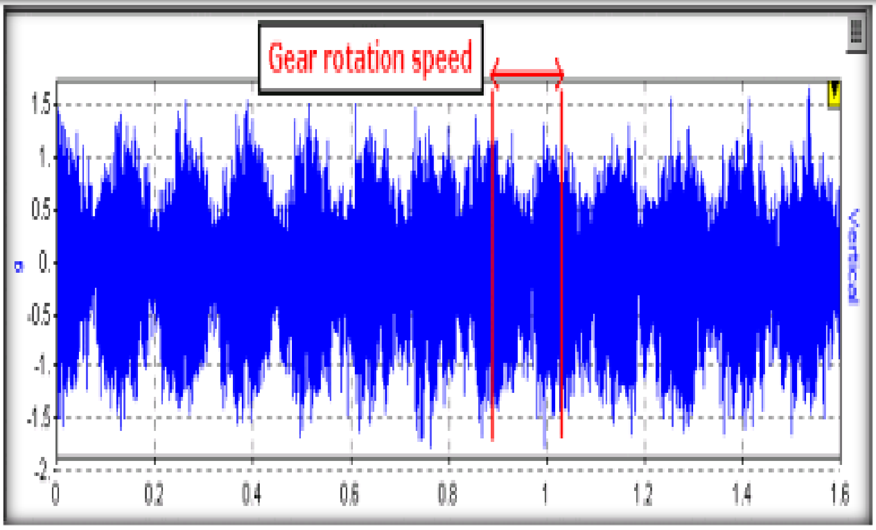
النقطة الأولى هى أننا بحاجة للتعرف على بصمة الإهتزازات والثانية إننا بحاجة إلى إتقان أدوات تحليل الترددات الجانبية "sidebands" حتى نتمكن من تحليل بيانات بصمة الإهتزازات بكل دقة. على سبيل المثال، سوف تجد في كثير من الأحيان الترددات الجانبية "sidebands" من سرعة التشغيل X١. وإذا كان برنامج الإهتزازات به إمكانيات ويعتمد عليه، يمكننا وضع مسافات التردد الجانبى عند X١، ثم نغير ببطء التردد المركزي حتى تظهرعلامات خطية على أعلى القمم.



فى حالة أخرى، يمكنك مشاهدة التردد المهيمن "dominant peak" محاط بالعديد من القمم الأخرى. فى مثل هذه الحالة يمكنك أن تبدأ بوضع قمة التردد المهيمن كما لو كان تردد مركزى "center frequency" ثم نقوم ببطئ ضبط الترددات الجانبية "sidebands" حتى تصطف مع مجموعة من القمم.وننظر إلى المسافات المتباعدة للقمم لمعرفة ما الذى تم تحويرة "modulation".



تذكر، أن التحوير "modulation" يحدث عادة عندما يتغير مستوى الإهتزازات من دورة إلى دورة أخرى "cycle to cycle"، كما هو الحال في العناصر المتحركة "rotating element" فى رولمان البللى تدخل وتخرج من منطقة الحمل "load zone" "going in and out of a load zone" أو الإحتكاك "rubbing" المتفاوت فى شدتة، ولذا فمن المهم فهم ومعرفة مصدر التحوير "modulation"، فإنه يساعدنا فى معرفة ماذا يحدث داخل الماكينة وبالتالى فهم حالة الماكينة.



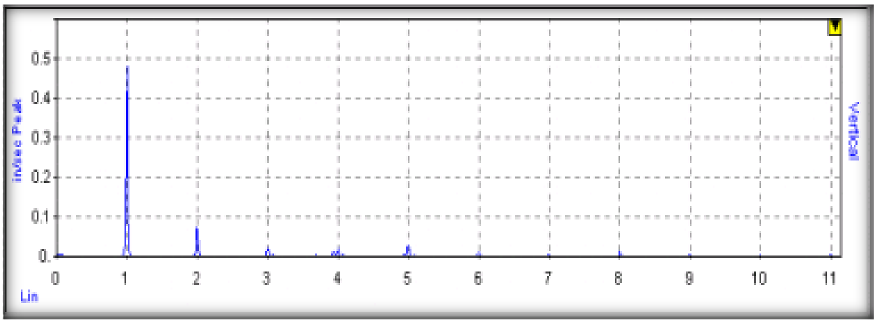
١-٤- ضوضاء الأرضية و"المطبات" "Noise floor and humps"

حتى الآن درسنا التوافقات "harmonics" والترددات الجانبية "sidebands". عندما ننظر للمرة الأولى فى بصمة الإهتزازات "spectrum" وبمجرد الانتهاء من التحقق من أن بيانات البصمة على ما يرام "OK" أى لا يوجد منحدرات للتزحلق "ski-slope"، وسوف ننظر لوجود الترددات الجانبية "sidebands" والتوافقات "harmonics".

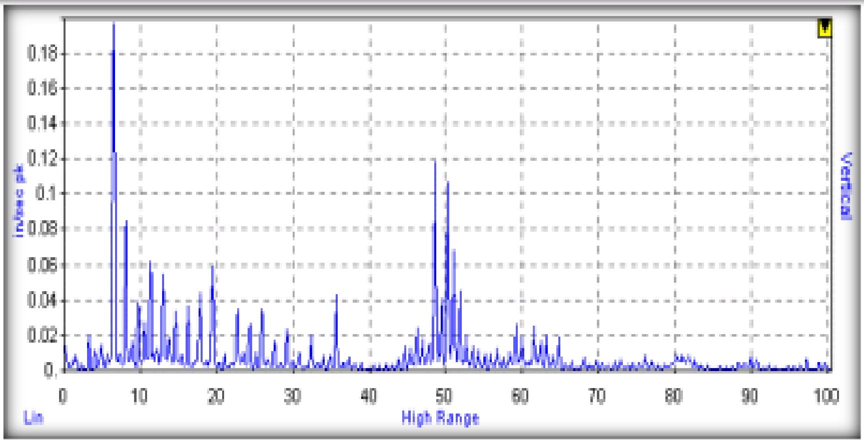
ويجب أن ننظر أيضاً في ضوضاء الأرضية "Noise floor" والتحقق من وجود مطبات "humps" في بيانات البصمة.

وسوف نتعرف على كل من ضوضاء الأرضية " Noise floor" وكذلك المطبات "humps". عندما ننظر إلى مستويات السعة "amplitude levels" فى بصمة الإهتزازات نجدها عادة قريبة جداً من الصفر، مع وجود قمم "peaks" صغيرة تبرز وكأنها جزر صغيرة ترتفع عن مستوى البحر.

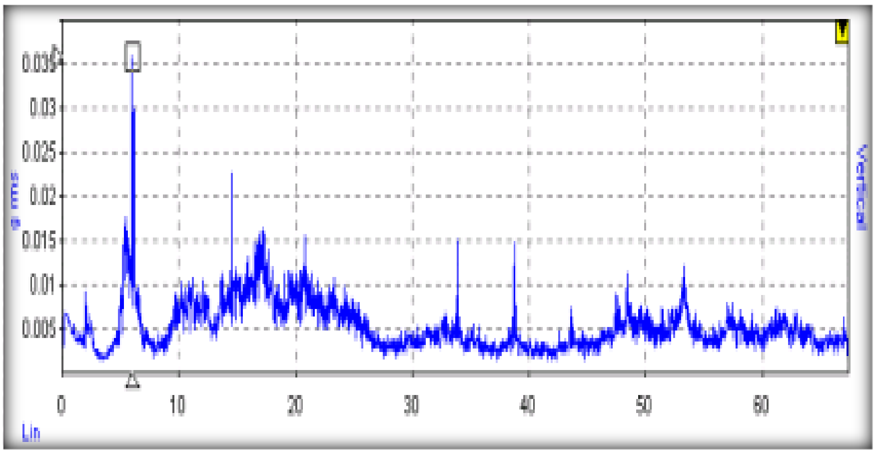
ضوضاء الأرضية "Noise floor" تشبه موجة البحر. وهى تمثل إما خلفية الإهتزازات (الضوضاء الناتجة من الماكينة أو الماكينات القريبة منها)، أو تمثل الحد السفلى من نظام القياس. وفى كلتا الحالتين، عندما تكون جيدة ومسطحة مثل البصمة التالية فلا تفكر فيها كثيراً.



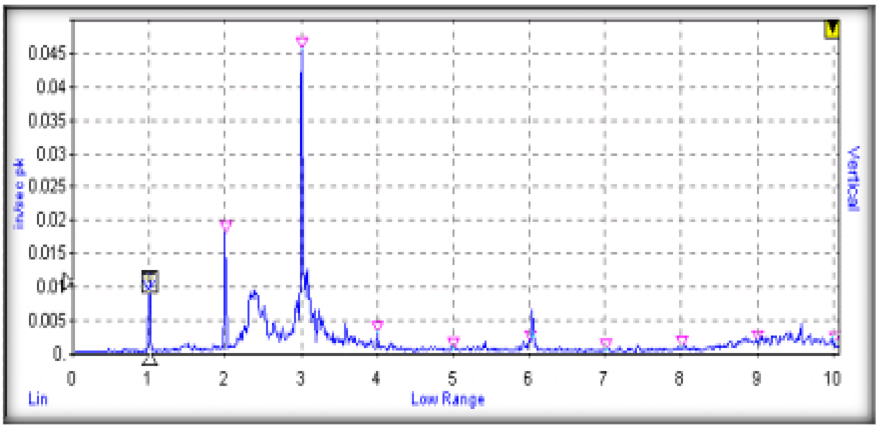
ومع ذلك، لمجموعة متنوعة من الأسباب، سوف ترى حالات والتى فيها ضوضاء الأرضية "Noise floor" تبدو مرفوعة إلى أعلى إما على طول البصمة أو فى أجزاء معينة.



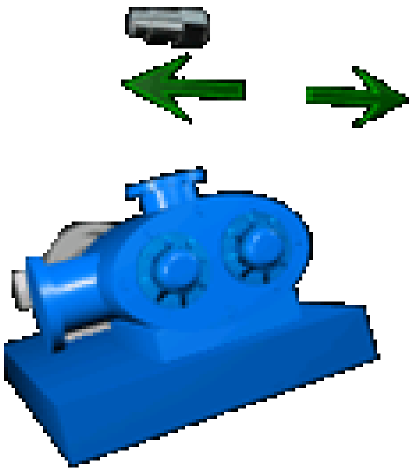
إذا إرتفعت ضوضاء الأرضية "Noise floor"، فمن الممكن أن يكون هناك تآكل مفرط فى رولمان البللى. إذا كانت الضوضاء تتجه نحو الترددات العالية، فمن الممكن أن تكون المشكلة فى العملية الإنتاجية أو السريان "flow" (هواء/ماء)، مع إمكانية حدوث التكهف "cavitation".



إذا ظهرت ضوضاء الأرضية "Noise floor" مرتفعة فى مناطق محددة بالبصمة فيوجد عدد قليل من الإحتمالات. من الممكن وجود مشكلة خطيرة نتيجة تآكل برولمان البللى وعندما تكون المشكلة أكثر سوءًا سيرتفع المزيد من الضوضاء "Noise floor".

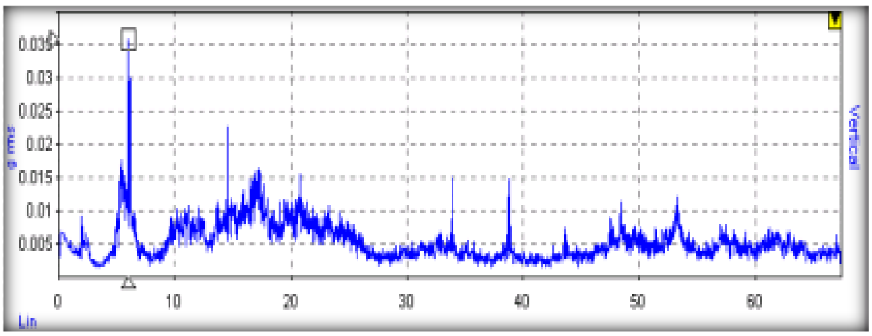


الاحتمال الثاني هو إمكانية وجود رنين "resonance". أحياناً كثيرة ستجد قمم "peaks" فى بصمة الإهتزازات لها قاعدة عريضة جداً وتبدو وكأنها مطبات "humps" بسبب الرنين. إذا لم توجد علامات لتآكل رولمان البللى، وأن القمم فى البصمة تظهر فقط فى محور واحد (غالباً ما يكون الرنين إتجاهى) وهذا هو السبب المحتمل.

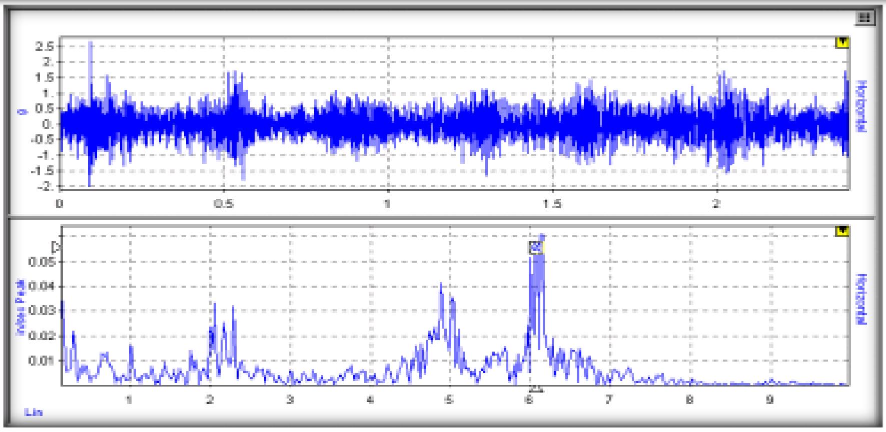


يمكنك أيضاً رؤية مطبات "humps" فى البصمة عند وجود عدد كبير من التوافقات المتباعدة. إذا كانت درجة وضوح البصمة "adequate resolution" غير كافية، كل الترددات الجانبية "sidebands" يمكن أن تظهر كفقاعة "blob". إذا أمكن قياس الإهتزازات بدقة أعلى وبدرجة وضوح ١٦٠٠ خط بدلاً من ٦٠٠ خط يمكنك رؤية عدد كبير من القمم بدلاً من الفقاقيع "blob".

الضوضاء الناتجة من السريان "flow" (هواء/ماء) وكذلك التكهف "cavitation" يمكن أن يسببا مطبات "humps" فى بصمة الإهتزازات. فمن الحكمة دائماً أن ننظر إلى الشكل الموجى لعلامات التكهف والضوضاء وغيرها.



في هذا المثال لدينا علامات للرنين "resonance" حول الترددات X٥ و X٦. إنها مطبات تقليدية "humps" في بيانات البصمة. في الواقع نفس المطبات ليست واضحة فى الإتجاهين الرأسى والمحورى. أيضاً، إنظر إلى الشكل الموجى "time waveform". يمكنك أن ترى بروز من الطاقة "energy" بسبب التكهف "cavitation" أو إدخال الهواء إلى المضخة "pump".

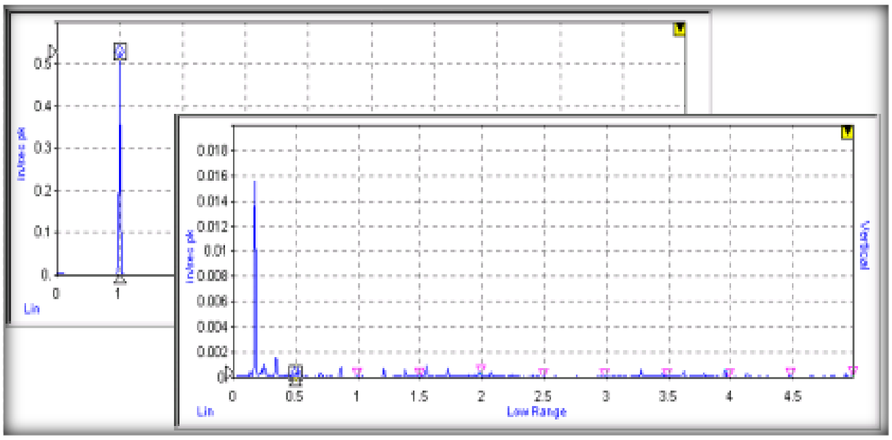


يجب عليك دائماً أن تكون واعيا من الماكينات الموجودة حول الماكينة التى تراقبها – حيث يمكن أن تكون تلك الماكينات المجاورة هى مصدر الإهتزازات فى بصمة الإهتزازات. إذا كنت تظن أنك ترى الإهتزازات من ماكينة أخرى مجاورة. يمكنك أن تحدد تلك الترددات وتنظر على القياسات من الماكينة المحيطة لمعرفة ما إذا كان يمكنك الحصول على تطابق "match". ربما لا تحتاج عمل أكثر من ذلك، ولكن على الأقل أمكنك فهم مصدر هذه الترددات فى البصمة.

١-٥- أهمية سعة الإهتزازات "importance of vibration amplitude"

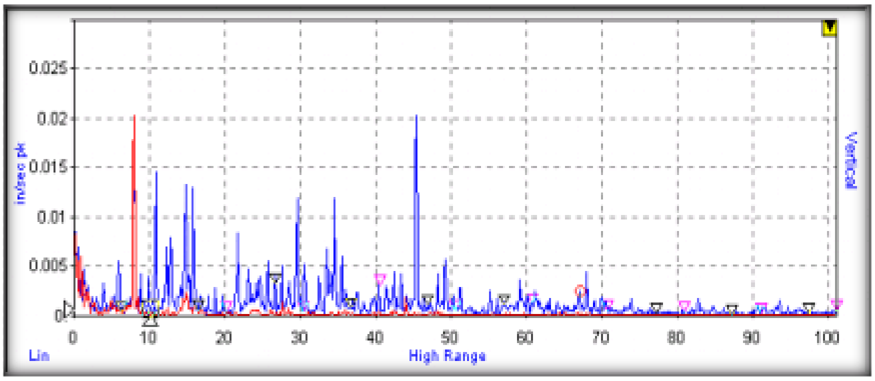
يمكننا إستعراض بصمة الإهتزازات ورؤية أنماطها المختلفة "pattern" من توافقات "harmonics" أوقمم مهيمنة "dominant peak" وقبل أن تدق ناقوس الخطر يجب التحقق أولاً من السعة "amplitude".

كلاً من هذه البصمات "spectra" تظهر قمة عالية عند X١ (والبصمة الثانية قمة عند X١ لمروحة يحركها ترس). ولكن بطبيعة الحال مقياس السعة "amplitude scale" مختلف بشكل كبير. وبالطبع نحن مهتمين جداً بتغير مستوى السعة "amplitude levels" ولكن يجب الإهتمام أيضاً بكيفية التغيير.



١-٦- مقارنة بصمات الإهتزازات "Spectral comparison overview"

سوف نناقش أهمية مقارنة بصمات الإهتزازات وأيضاً مجموعة من الأساليب البيانية لتنفيذ هذه المقارنات.



بالإضافة إلى معرفة ما تستطيع معرفته من البصمة الفردية للإهتزازات "individual spectrum"، يجب أيضاً مقارنتها ببصمات أخرى متاحة لديك من القراءات السابقة، البصمة المرجعية "reference spectra"، حدود الإنذار"alarm limits"، بصمة تم أخذها من إتجاهات أخرى "other axes"، بصمة من أماكن أخرى "locations" على الماكينة، وبصمات أخرى من نفس المكان ونفس الإتجاه "same location and axis" ولكن من ماكينات متماثلة " identical machines".

وهناك سببين لعمل المقارنات:-

السبب الأول:-

هو معرفة كيف تغيرت البيانات (أو كيفية إختلافها عن البصمة العادية "norm")، وفهم حركة الماكينة "motion".

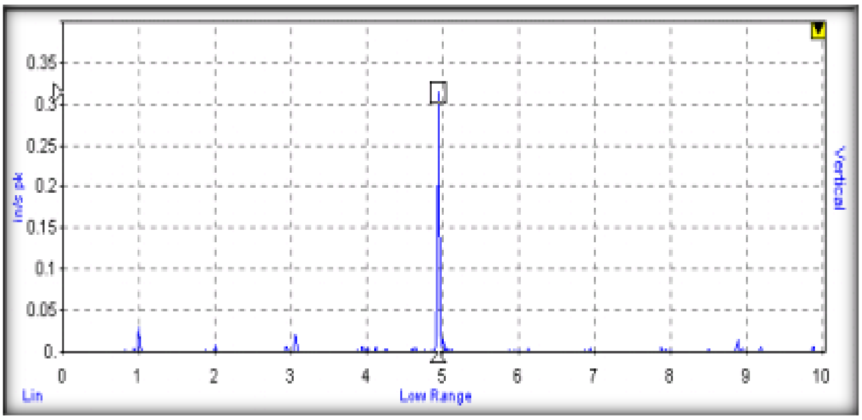
أساس مراقبة حالة الماكينات "Condition monitoring" هو البحث عن التغير"change". ونعتقد أننا يمكننا التعرف على المشاكل "recognize problems" من خلال النظر فقط فى بصمة واحدة للإهتزازات "single spectrum"، ولكن إذا لم نتمكن من معرفة بيانات البصمة فى الحالة العادية (بدون مشاكل)، أو ما إذا كانت مستويات "levels" أو شكل البصمة "patterns" قد تغير، لايمكننا معرفة ما إذا كان هناك مشكلة أم لا ؟.

"universal database" لمعرفة الكيفية التى تهتز بها كل ماكينة، لكى نستخدمها كأساس لإختبار الماكينات التى لدينا. ولكن هذا لا يمكن أن يحدث.

بدلاً من إستخدام بيانات البصمات السابقة، والبيانات التى جمعناها على ماكينات متماثلة أخرى داخل المصنع، كأساس لإختبار الماكينات (بصمات المرجعية). فمن الممكن أيضاً إستخدام البصمات

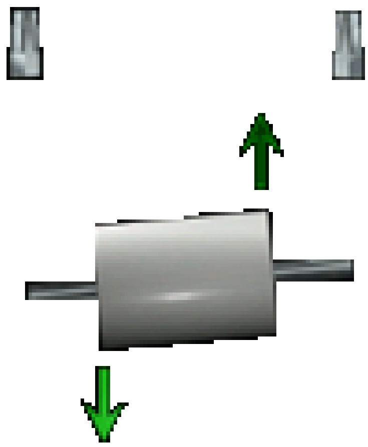
المأخوذة بعد إجراء العمرات الجسيمة على الماكينات (أو عندما كانت الماكينة جديدة) كبصمات مرجعية، أو إستخدام الخط مرجعى "baseline" المستمد من البيانات الإحصائية.

يمكننا مشاهدة كيفية تغير كل من البصمة والشكل الموجى وإستخدام المعرفة المتزايدة " growing knowledge" عن الماكينة وكذلك تحليل الإهتزازات لتفسير التغيير الحادث " interpret the change".



السبب الثانى لعمل المقارنات:-

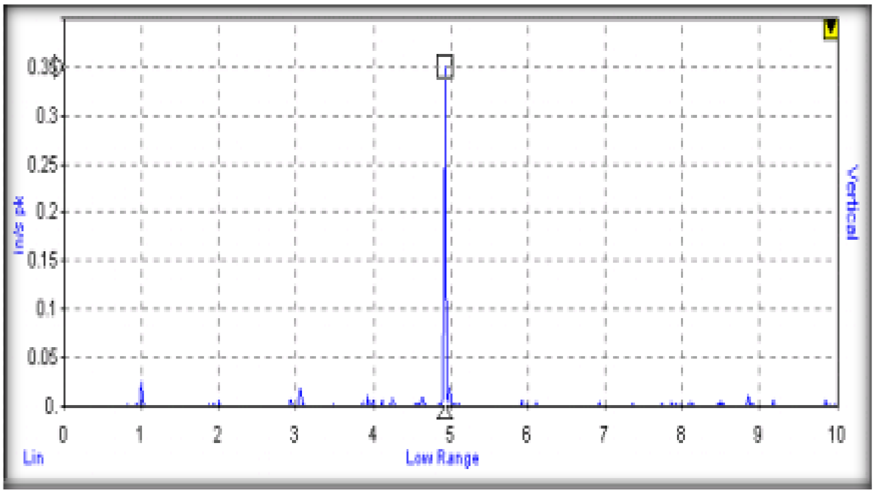
هو فهم كيفية إهتزاز الماكينة كهيكل "structure". ولأن الماكينة كلها تهتز وبالتالى يمكن مقارنة البيانات من إتجاه واحد إلى إتجاه آخر، وفى أماكن مختلفة "locations" لفهم حركة الماكينة.



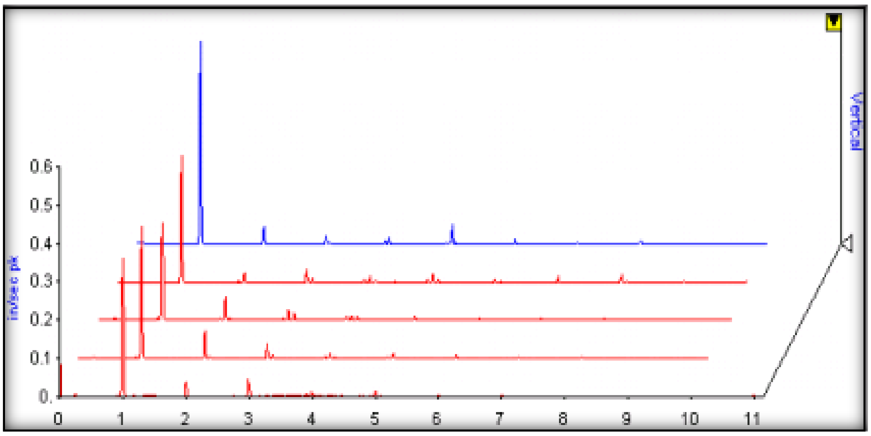
نود أن نكون قادرين على عمل محاكاه بالحركة البطيئة للأجزاء الداخلية للماكينة، والمبالغة فى الحركة حيث يمكننا أن نرى بوضوح كيف تهتز. مشاكل الماكينات مثل عدم الإتزان "imbalance" وعدم المحورية "misalignment" والرنين "resonances" وأقل درجة للتفكك "looseness" يكون أفضل تحليل وتشخيص لها من خلال فهم حركة الماكينة ككل ولكننا لايمكننا القيام بذلك إلا من خلال برامج خاصة ووقتاً إضافياً أكبر مما يتوفر لدينا أثناء جمع البيانات.

١-٦-١- المقارنة بالبيانات المرجعية "Spectral comparisons to reference data"

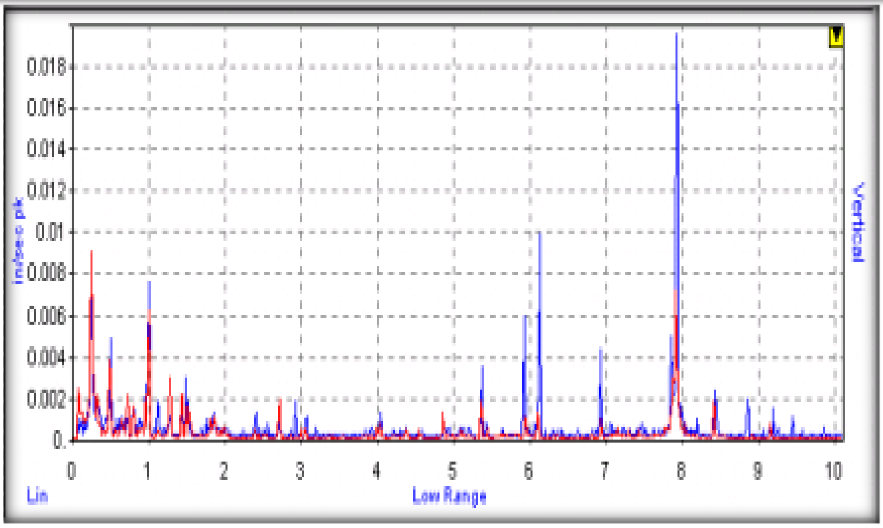
مراقبة حالة الماكينات تعتمد بشكل أساسى على مقارنات بين البصمة الحالية والبصمة القديمة المرجعية. إذا أمكنك معرفة مقدار التغير فى البيانات ومعرفة السبب الرئيسى فى هذا التغيير (ماهى الترددات) أمكنك الوصول للحقيقة.



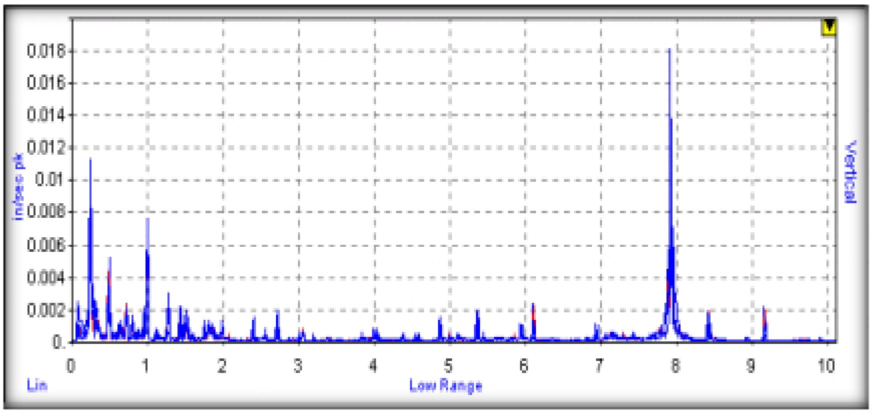
برامج تحليل الإهتزازات "analysis software" تسمح لك بإستدعاء "recall" القياسات السابقة، مما يتيح لك إلقاء نظرة سريعة على كل مستويات الإهتزازات منذ آخر قياس.



أسهل طريقة لعرض البيانات هو تركيب الرسوم البيانية "overlay the graphs" واحدة فوق الأخرى. ومن ثم يمكننا أن نرى بالضبط كيف تتغير البيانات عند كل قمة "peak" فى البصمة. يمكنك عرض ثلاثة أو أربعة رسوم بيانية بهذه الطريقة مع متابعة البصمة من خلال تاريخ القياس.



ونحن نبحث عن التغيير فى مستوى الإهتزازات، فإذا كانت كل البصمات تتطابق بشكل وثيق "overlay closely"، فلا يوجد ما يدعو للقلق.



ولكن عندما ترى تغييراً كبيراً "significant change"، فحان الوقت لتحليل بيانات الإهتزازات بشكل وثيق.

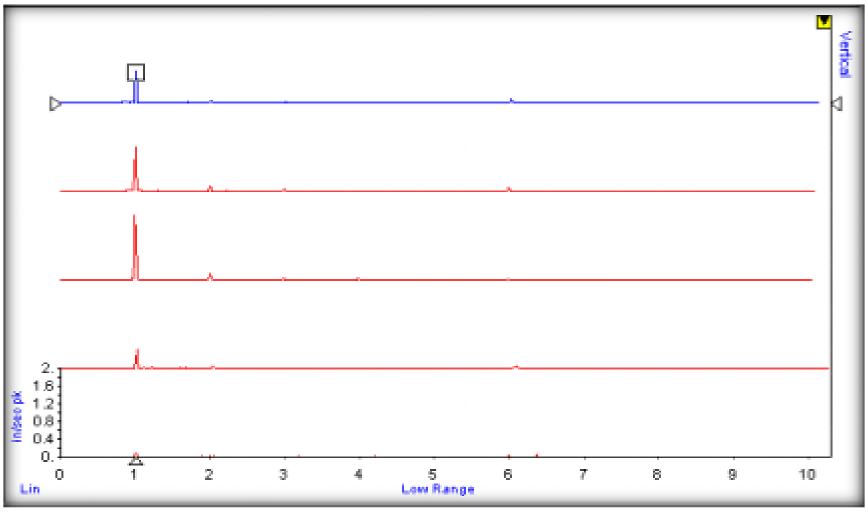
يمكنك إختيار واحدة من البصمات المعروضة، أو عرض البيانات بطريقة تظهر أو تسلط الضوء على أفضل تغيير. فى بعض البرامج يمكنك أن ترى منحنى الإطار "trend of the level" لمستوى الإهتزازات عند تردد معين مع مرور الوقت.

مع البرامج الأخرى منحنى الإطار يكون محدد بحدود إنذار "alarm bands" تم تحديدها سلفاً من الخبره المكتسبة لكل ماكينة.

١-٦-٢- المقارنة فى مصفوفة "stacked plots"

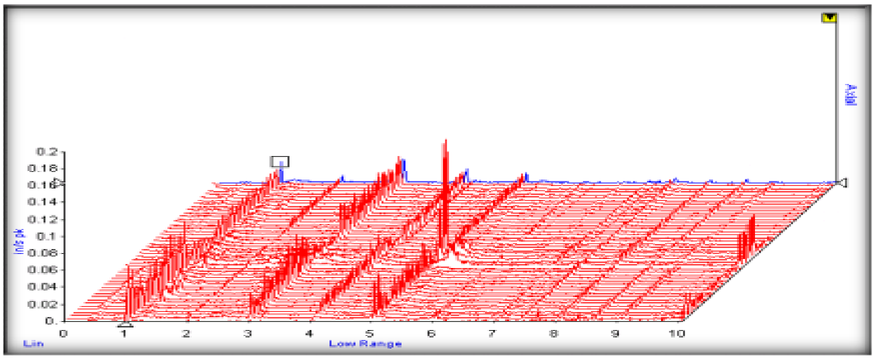
طريقة أخرى لمقارنة بيانات بصمات الإهتزازات "graphical comparison" تسمح بعض البرامج للرسوم البيانية لبصمة الإهتزازات أن تكون مصفوفة أو مكدسة "stacked" رأسياً. ويمكنك النظر

فى الفرق بين مستوى كل قمة كبرى "major peak" بوضوح تام وفى نفس الوقت رؤية البصمة بالكامل.



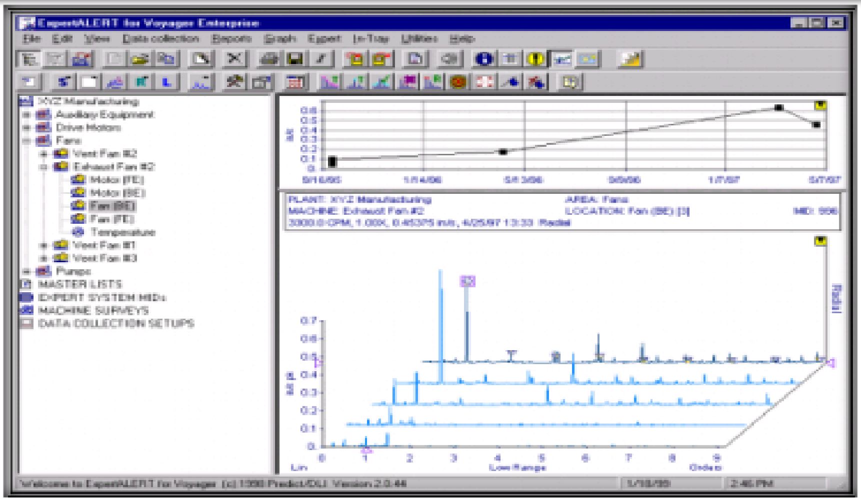
١-٦-٣- المقارنة فى شلالات "waterfall plot"

الطريقة الشعبية لدراسة عينة كبيرة من بصمات الإهتزازات هى مخطط الشلالات " waterfall plot". هذا المخطط يستخدم ليبين كيفية تغيير القمم "peaks" وشكل "patterns" البصمات خلال فترة زمنية محددة.

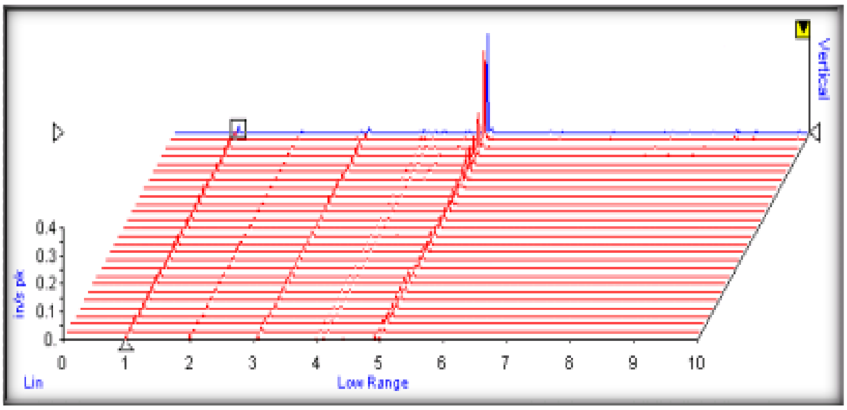


فى بعض البرامج، يمكننا تغيير نسبة الأبعاد للحصول على أفضل رؤية لبصمات الإهتزازات ومنحنى الطور"trends". فى بعض الأحيان يكون النظر من الجانب أفضل. وفى أحيان أخرى نرى أن وجود البيانات منتظمة فى صف واحد يجعل من السهل أن نرى علاقة القمم ببعض.

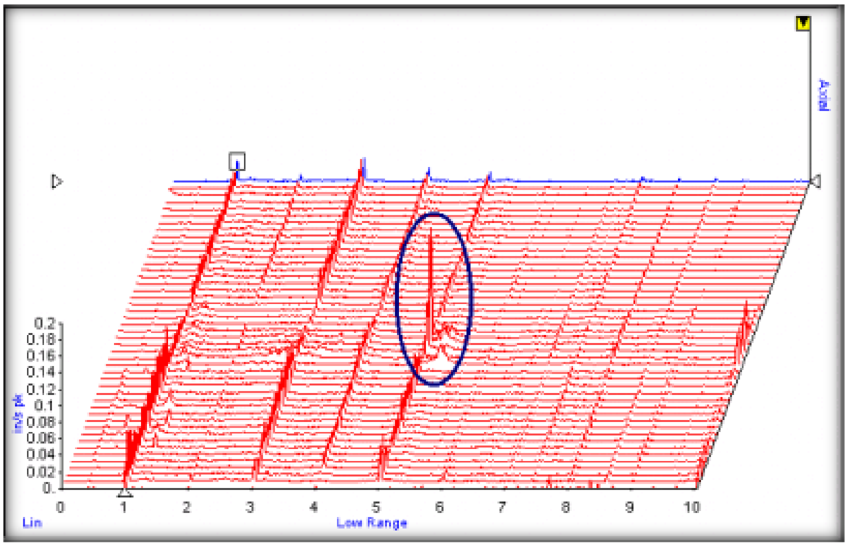
يوجد رسم بيانى متكامل لمنحنى الإطراد، وهو متاح فى بعض البرامج ويبرز كيفية تغيير مستوى الإهتزازات عند تردد معين أوعند نطاق معين أو ضمن نطاق صغير"small band".



مخطط الشلالات "waterfall plot" يظهر قدر كبير من المعلومات. يمكن أن يكشف عن كل أساليب منحنى الطور "trends" وأنماط وأشكال مثيرة للإهتمام.



بعد سنوات قليلة سوف نرى متى بدأ تطور العطل ومتى إختفى بعد التعامل معه (بعد الإصلاح على سبيل المثال). ويعتبر ذلك بمثابة إستعراض تاريخى ممتاز على كيفية تطور العطل، ومن الضرورى معرفة مستوى الإهتزازات قبل وبعد إصلاح العطل.



١-٦-٤- ملخص لعملية المقارنة

حتى الآن نظرنا إلى مقارنات بين البيانات التى تم جمعها حالياً والبصمات التى تم جمعها سابقاً. سواءً كانت المقارنة لقياس واحد فقط، أوكان لآخر أربعة قياسات، أو سجل القياسات السابقة كلها، وسيكون لك الخيار دائماً للحكم على نوعية البيانات المرجعية ومدى ملاءمتها لتكون مرجعاً لك.

ناقشنا سابقاً تحديد مرجعية القياس. وناقشنا كيف يمكن إستخدامها لعمل التقارير ووضع حدود الإنذار. وعندما يحين الوقت لإجراء التحليلات اللازمة من المكن أن تكون هذه البيانات مفيدة للغاية.

على سبيل المثال، من خلال برنامج الإهتزازات المستخدم يمكنك أن تقوم بإنشاء مرجعية إحصائية "statistical reference" تقوم على "الانحراف المعياري "standard deviation". سيكون من المفيد جداً أن تقوم بتركيب تلك الإشارة على بصمة الإهتزازات بحيث يمكنك أن تقارن بسرعة قياسات الإهتزازات الجديدة بالمرجعية الإحصائية.

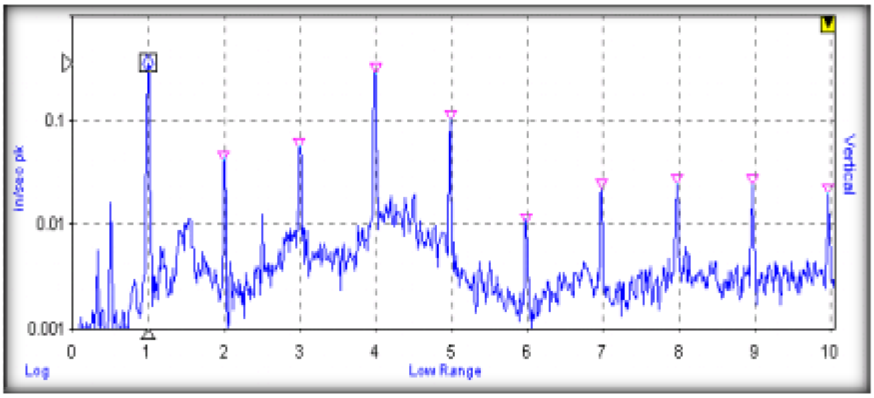
وبالمثل أيضاً من خلال برنامج الإهتزازات المستخدم يكون من المفيد مقارنة نطاق الانذارات "mask alarms – band alarms" إن وجد بالقياسات الجديدة.

مقارنة نطاق الإنذار "mask alarms – band alarms" ربما يكون أكثر فائدة خلال مرحلة إكتشاف العطل وليس خلال مرحلة تحليل العطل. ونطاق الإنذارات غالباً لا يخبرك كثيراً حول البصمة العادية لإهتزازات الماكينة.

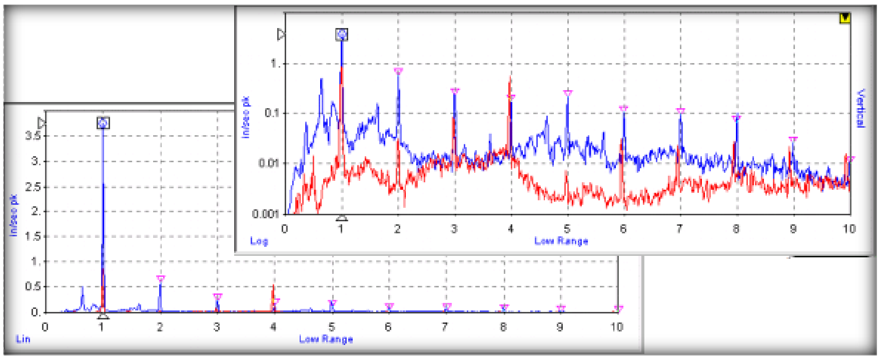
ولكن المرجعية الإحصائية "statistical reference" هى أكثر فائدة فى هذا الغرض لأنها مستمدة من البيانات، وتشير إلى مدى الاختلاف.

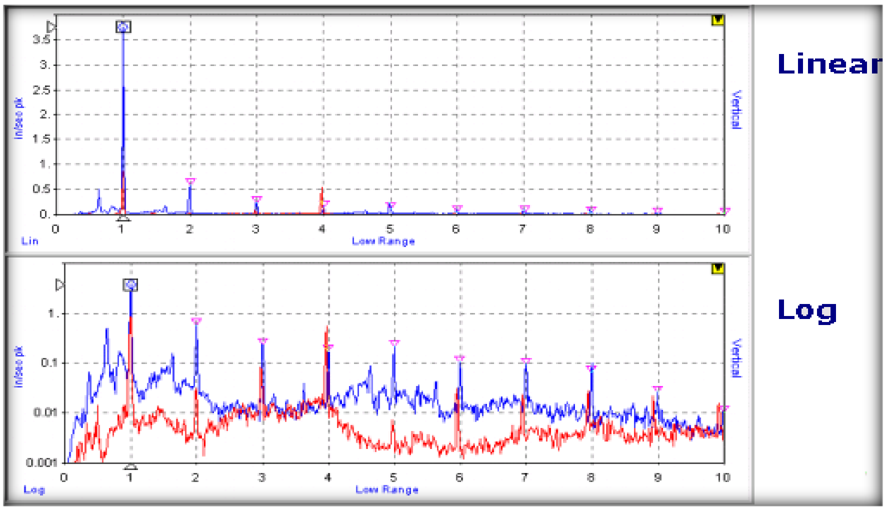
١-٧- العرض اللوغاريتمى "Logarithmic displays"

نحن كثيراً ما نستخدم المقياس اللوغريتمى لإظهار التوافقات "harmonics" والترددات الجانبية "sidebands" وأنماط أخرى "patterns" بالبصمة. لأن المقياس اللوغاريتمى يسمح لك أن ترى السعات الصغيرة فى وجود السعات الكبيرة.

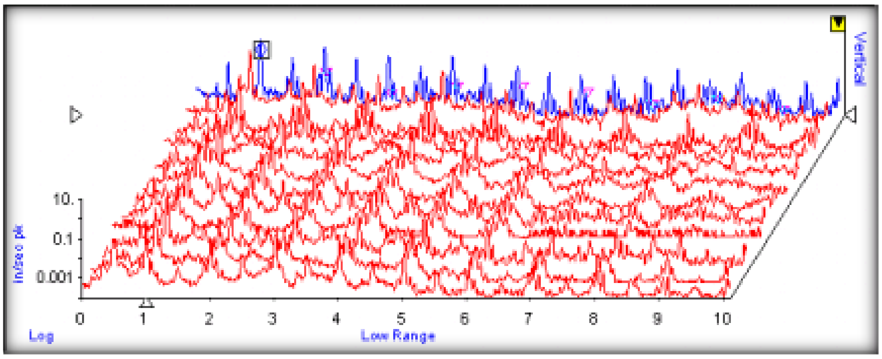


والمقياس اللوغاريتمى "logarithmic scaling" مفيد أيضاً عند تنفيذ مقارنات بين بصمتين (أو بين البصمة الحالية والبصمة المرجعية). مجرد إلقاء النظر إلى الفرق بين إثنين من هذه الرسومات البيانية – وكلاهما تحتوى نفس البيانات.



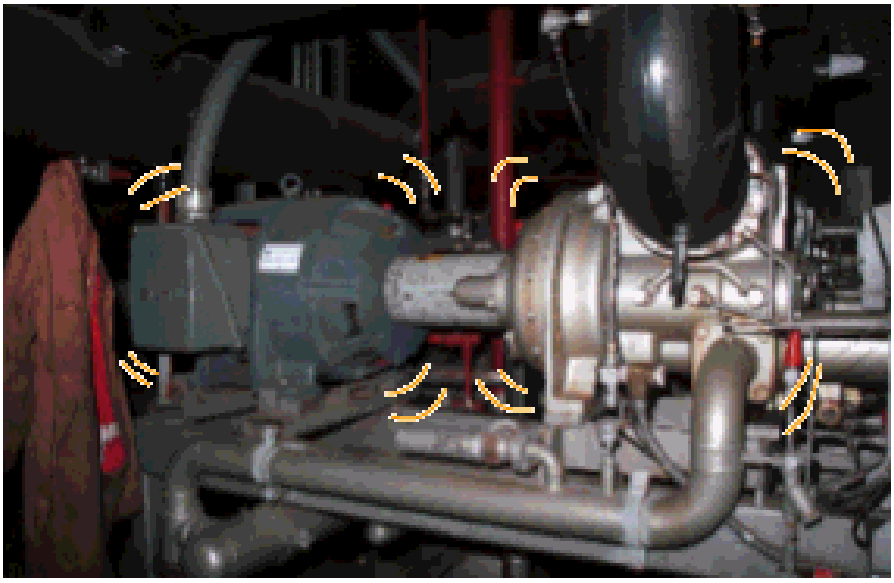


نلاحظ أنه فى حين المقياس اللوغاريتمى مفيد فى المقارنات، فإنه غير مفيد فى مخطط الشلالات "waterfall plot" لوجود تفاصيل أكثر من اللازم.



١-٨- فهم إهتزازات الماكينة "Understanding machine vibration the big picture"

ببساطة، إذا أمكنك معرفة كيفية إهتزاز الماكينة بأكملها، فإن حالات مثل عدم الإتزان، وعدم سنزرة المحاور، والرنين "structural resonances" يكون من السهل جداً حلها. ومشاكل البللى يكون من السهل تحديده، وأيضاً يكون من السهل تحديد المسامير المفكوكة بالماكينة.



وسوف نتعرض لمقارنة الإهتزازات من مكان "one location" إلى آخر وبين الثلاث محاور "axes".

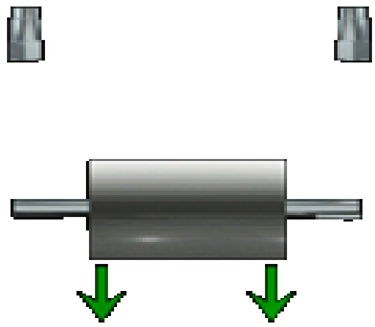
١-٨-١- المقارنة بمحاور أخرى "other axes"

عند تحليل بيانات الإهتزازات، وإذا توقعت مشاكل عدم الإتزان، عدم ضبط المحاور، الرنين، ومشاكل أخرى لها علاقة بسرعة الدوران "rotational forces"، والحقيقة أن العديد من هذه العيوب ينتج عنها إهتزازات إتجاهية للغاية "directional". ولذلك فيجب عليك أن تقارن مستويات الإهتزازات فى الإتجاهات الثلاثة (الإتجاه الرأسى "vertical"، والأفقى "horizontal"، والمحورى "axial").

فمثلاً، إذا كان لدينا ماكينة بسيطة تتكون من (موتور- مضخة) وتوقعت عدم الإتزان مثلاً (وجود قمة عالية عند X١)، فيجب علينا أن نفحص بصمة الإهتزازات فى المحاور الثلاث زيادة فى التأكيد "confirmation".

حيث أن قوة سرعة الدوران "rotational forces" ينتج عنها إهتزازات فى الإتجاه الأفقى والرأسى وتكون قليلة فى الإتجاه المحورى.

وإنظر لهذا المثال، عند دراسة مختلف المشاكل بمزيد من التفصيل، فإنه من مصلحتك محاولة فهم القوى المعنية (الموجودة). هذا سوف يساعدك على فهم ما الذى تبحث عنه فى محاور الإهتزازات الثلاثة "three axes of vibration".



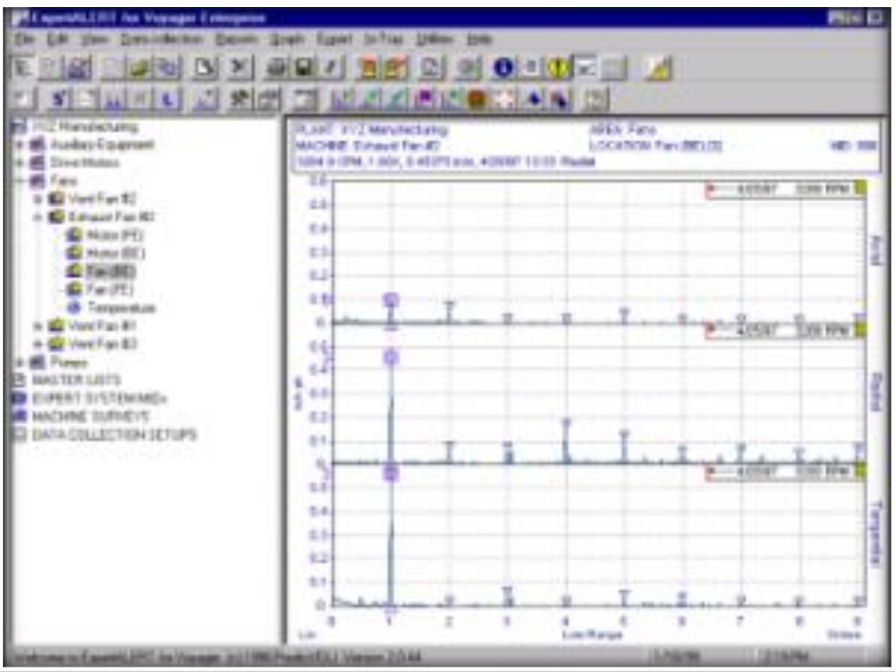
ويجب أن تأخذ بعين الإعتبار إتجاه الماكينة "orientation". حيث أن الماكينات الرأسية تهتز بشكل مختلف عن الماكينات الأفقية. وإذا نظرنا إلى طلمبة أفقية فإنة يقتصر(تتقيد) حركتها فى الإتجاه الرأسى مقارنةً بالإتجاه الأفقى، ولا تتوقع أن الإهتزازات الرأسية والأفقية تكون متساوية.

طلمبة رأسية (عمودية)، فمن المحتمل أن تكون الاهتزازات متساوية فى إتجاه الراديال "radial" وفى الإتجاه التماسى "tangential" (إثنين من الإتجاهات الإفقيه)، مالم تقيد الحركة بعض الشئ.

وهذا هو إحدى الأسباب الرئيسية التى تجعلنا نوصى بجمع القياسات من محاور متعددة إن أمكن، إما بإستخدام لاقط إهتزازات ثلاثى المحاور "triaxial sensor" أو بلاقط القياس العادى ولكن على الثلاث محاور إن أمكن. يمكنك أيضاً عمل قياسات إضافية للمتابعة وتأكيد التشخيص.

١-٨-٢- مقارنة الثلاث محاور "triaxial plot"

من الممكن عرض الثلاث محاور "triaxial plot" فى آن واحد (الرأسى والإفقى والمحورى).



١-٨-٣- المقارنة بأماكن مختلفة "another location"

من المهم جداً العلم بأن معرفة إهتزازت الماكينة بالكامل "whole-machine" يساعدنا فى التشخيص "diagnosis"، وعليه فإننا بحاجة لعمل مقارنات من نقطة واحدة على الماكينة إلى نقطة أخرى.

فمثلاً إذا كنت تتوقع مشكلة عدم ضبط المحاور "misalignment"، يجب مقارنة القياسات من نقط على جانبى الكوبلنج – الموتور والطلمبة على سبيل المثال.

إذا توقعت مثلاً مشكلة عدم الإتزان أو مشكلة الرنين/التفكك، فعليك بتحليل بصمة الإهتزازات فى نقاط مختلفة على نفس أجزاء الماكينة لمعرفة ما إذا كان هناك مستويات أعلى للإهتزازات فى نفس الإتجاه. إذا كانت الماكينة تتحرك صعوداً وهبوطاً "bouncing"، فمن المتوقع أن جميع القياسات فى الإتجاه العمودى "vertical" مرتفعة عند تردد الرنين "resonant frequency".

خلاصة القول هو أنه عند البدء فى تعلم مختلف مشاكل الماكينات "fault conditions"، فكر فى كيفية إهتزاز الماكينة كلها، ومن ثم واصل قياساتك وأتبعها بالتحليل تبعاً لذلك.

مقارنة البيانات من أماكن مختلفة يمكن أن يساعد على تحديد الجزء المعيب. فمثلاً إذا كنت تحلل الإهتزازات من على الموتور من جهة الكوبلنج وتوقعت مشكلة رولمان البللى، ننصحك بإلقاء نظرة سريعة على قياسات الطلمبة (أو على قياسات الموتور من الجهة الأخرى).

تنتقل الإهتزازات "Vibration travels" خلال الماكينة حيث تنتقل الترددات المنخفضة " low frequencies" أكثر من الترددات العالية "high frequencies". ومسار نقل الحركة الميكانيكية "mechanical transmission path" (ويعتمد مسار إنتقال الإهتزازات خلال الماكينة على المقاومة أو الممانعة الميكانيكية "mechanical impedance") يؤثر على مستويات السعة التى تقاس فعلاً عند نقطة.

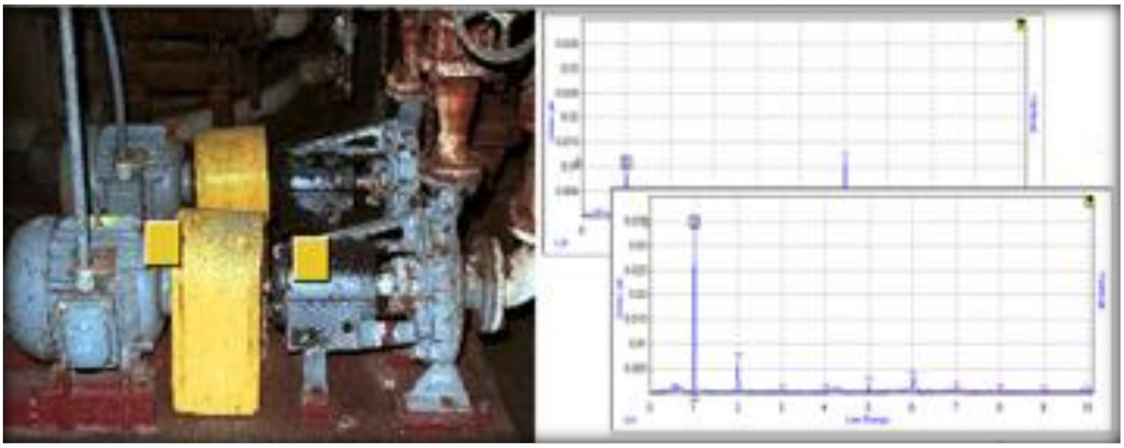
شهدنا حالات يكون فيها مستوى الترددات الأساسية لإنهيار رولمان البللى أعلى عند رولمان بللى الموتور فى حين أن المشكلة موجودة على رولمان بللى الطلمبة.

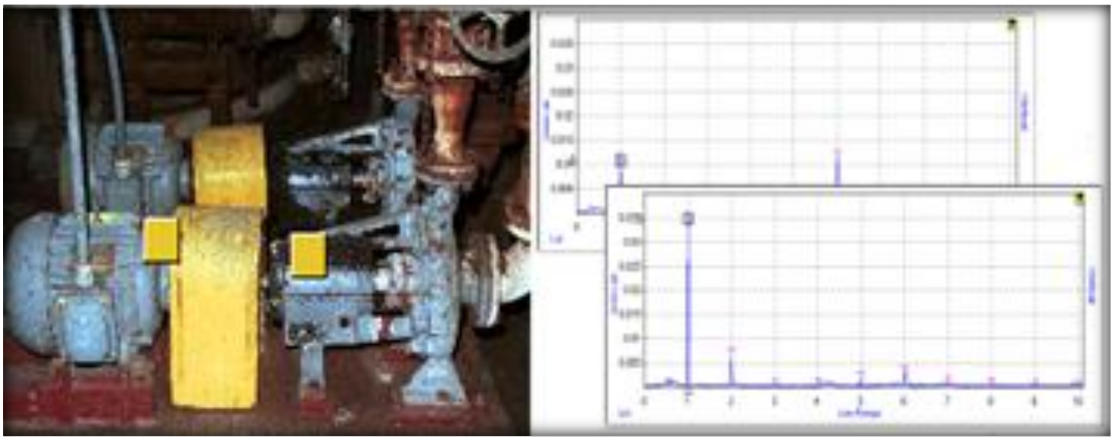
١-٨-٤- المقارنة بماكينة أخرى مشابه "Compare data to another machine"

فى كثير من الأحيان يكون من المفيد مقارنة البيانات من ماكينة إلى أخرى وهذه المقارنات تساعك على فهم أفضل لمعرفة الوضع الطبيعى للماكينة.

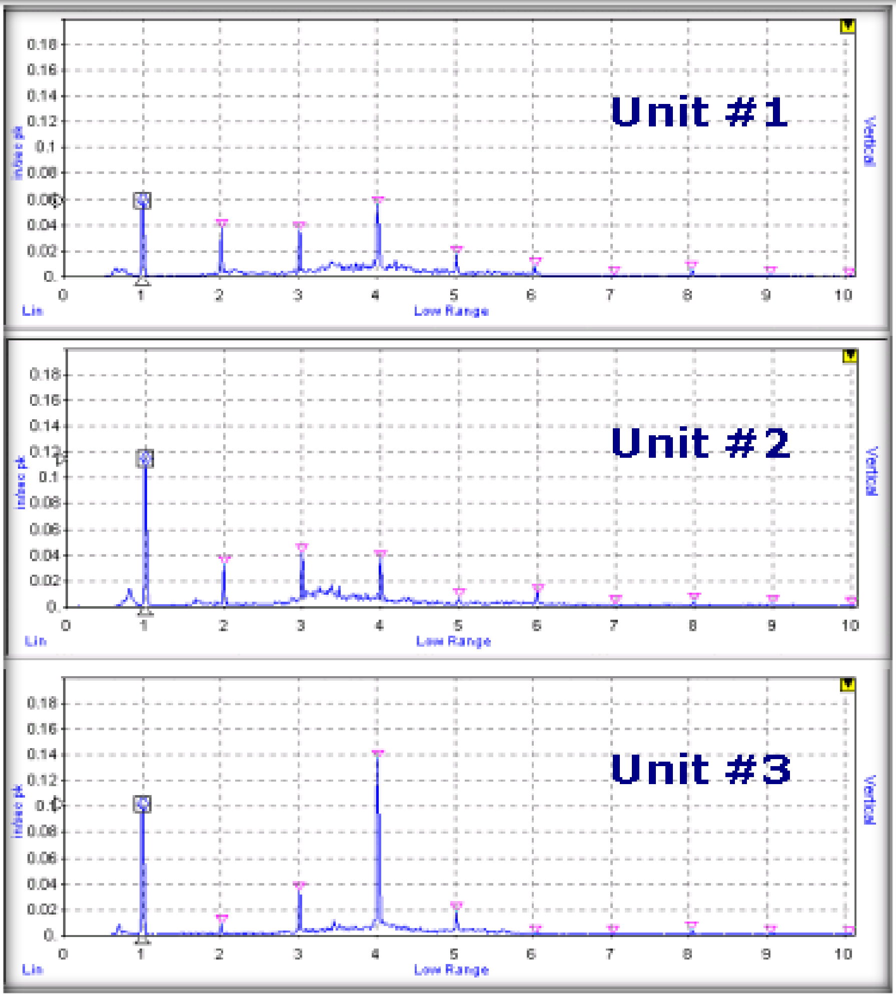
فى هذا المثال لدينا مقارنة بين إثنان من الماكينات المتشابه تماماً "identical" تظهر إختلاف كبير فى شكل "patterns" بصمة الإهتزازات – البصمة الأولى تبين أن إحدى الماكينات لها قمة عند X٦ أعلى من المعتاد (تردد ريش حدافة المضخة "vane rate peak") والأخرى بها قمة عالية عند

X١ (سرعة الدوران). وبدون هذه المقارنة بالبصمة المرجعية "reference" لا نستطيع معرفة الوضع الطبيعى لهذه الطلمبة.





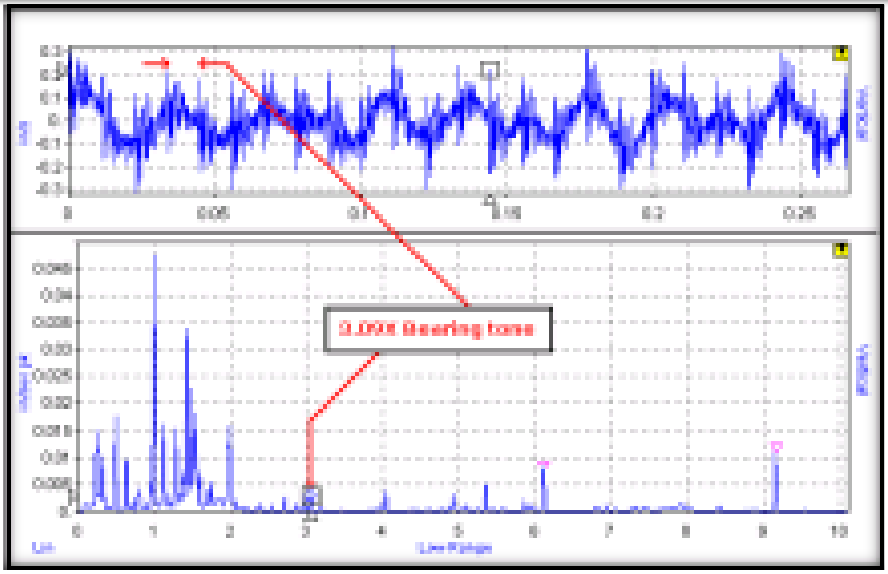
فى هذا المثال لدينا ثلاث مضخات عمودية متطابقة "identical vertical pumps". نلاحظ وجود توافقات منتشرة "harmonics"، ويبدو وجود رنين "resonance" حول تردد X٤ – وكل بصمة بها نفس المطبات "humps" عند تردد أكبر من X٣ وأقل من X٥. ويوجد أيضاً رنين "resonance" عند تردد أقل من X١.



يجب أن تكون حذراً مع هذه الطريقة. حيث يجب التأكد من أن المحرك للوحدة رقم ١ هو نفس المحرك للوحدة رقم ٢ (متشابهان). أيضاً يجب التأكد من أنهما مثبتان بنفس الطريقة. وبإستخدام القليل من الحس السليم "common sense" سوف تتأكد من أن هذا الأسلوب سوف تتعلم منه الكثير ويزيد معرفتك بالماكينات التابعة لك.

١-٩- تحليل بيانات الشكل الموجى "analyze time waveform data"

لقد شهدنا بالفعل مدى أهمية تحليل الشكل الموجى "time waveform" فى عملية التحليل. وكثيراً من دراسات الحالة "case histories" التى إستخدمناها حتى الآن تشير إلى الملاحظات التى وجدت بالشكل الموجى مثل "pulses، transients، sinusoidal patterns " وأكثر من ذلك.



مع العلم بأن الطريقة التى يتم بها قياس الشكل الموجى مهمة ولها تأثير كبير على فائدة تلك البيانات. بالطبع يمكنك دائماً العودة إلى الماكينة لجمع مزيد من البيانات، ولكن قد يكون من الأفضل جمع كل شئ تحتاجه أثناء القياس الروتينى "routine test".

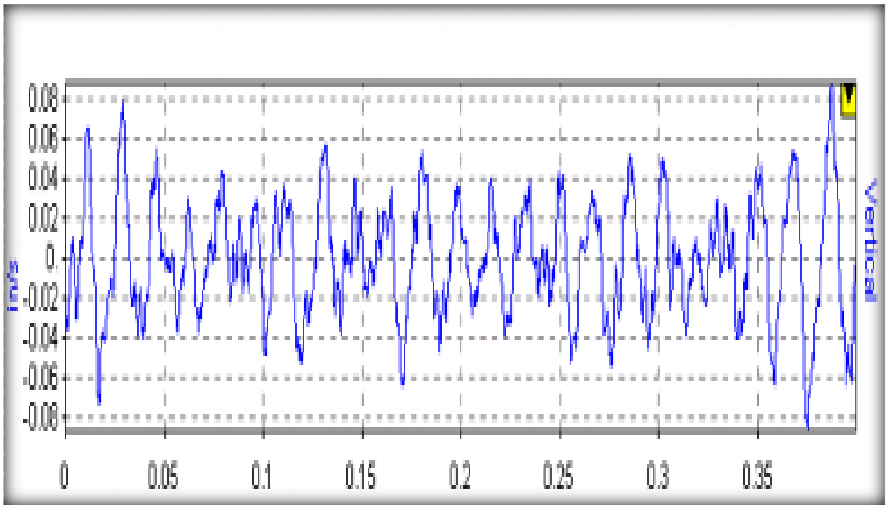
يوجد ثلاث أسباب تجعلنا نقوم بتحليل بيانات الشكل الموجى وهى:-

١- وجود ظواهر "phenomenon" فى الشكل الموجى غير موجودة فى بصمة الإهتزازات.

٢- يوجد العديد من الحالات "conditions" التى يتم التأكد منها بشكل جيد بالنظر فى الشكل الموجى.

٣- إستخدام الشكل الموجى لإجراء عمليات حسابية مفيدة "perform useful calculations" للمساعدة على فهم ما يجرى داخل الماكينة.

سوف نرى في كثير من الأحيان دليل على وجود مشكلة "evidence of a fault condition" فى الشكل الموجى لا نستطيع أن نراها فى البصمة "spectrum".

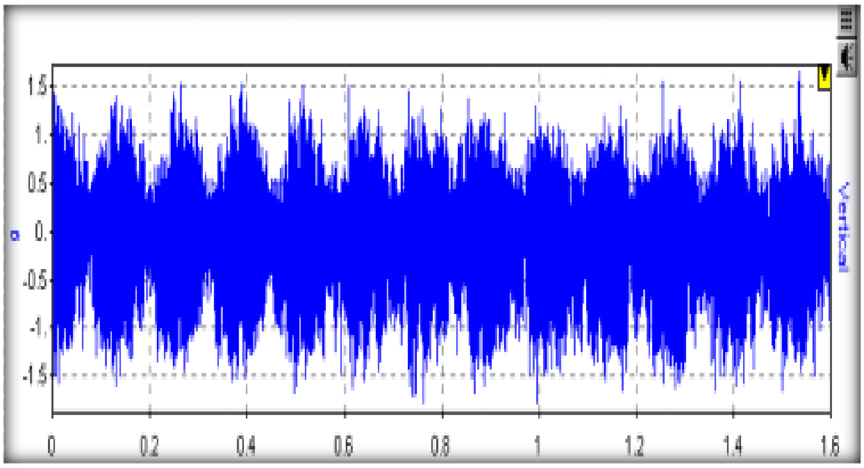


١-٩-١- وجود ظواهر "phenomenon" فى الشكل الموجى غير موجودة فى بصمة الإهتزازات

والأحداث غير الدورية "Non-periodic events" مثل (transients - pulses) لا تظهر فى البصمة – ولا يمكنك معرفة وجود نبضات "pulses" من خلال النظر فى البصمة بمفردها.

أيضاً، الأسنان المكسورة "broken teeth" فى صندوق التروس "gearboxe" تظهر بشكل واضح فى الشكل الموجى فى حين أنها من المستحيل تقريباً إكتشافها فى البصمة " impossible to detect".

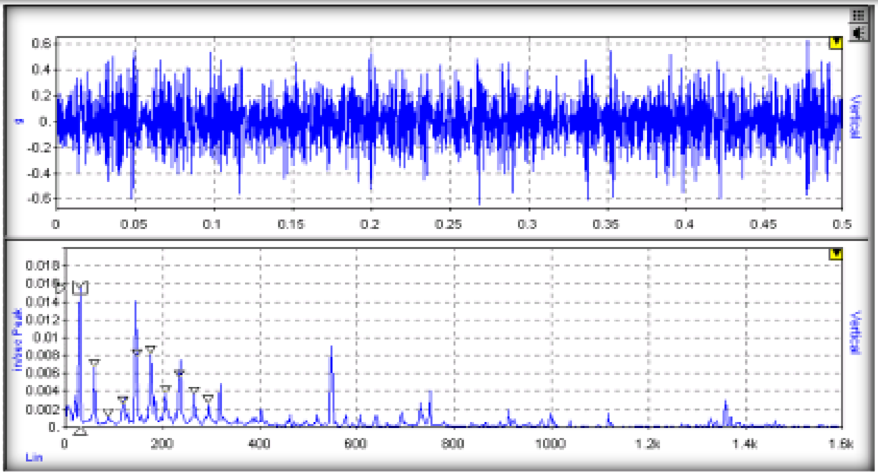
لهذا السبب، فى أجزاء مثل صندوق التروس، من المهم إستعراض الشكل الموجى حتى لو أن إستعراض البصمة يكشف القليل.



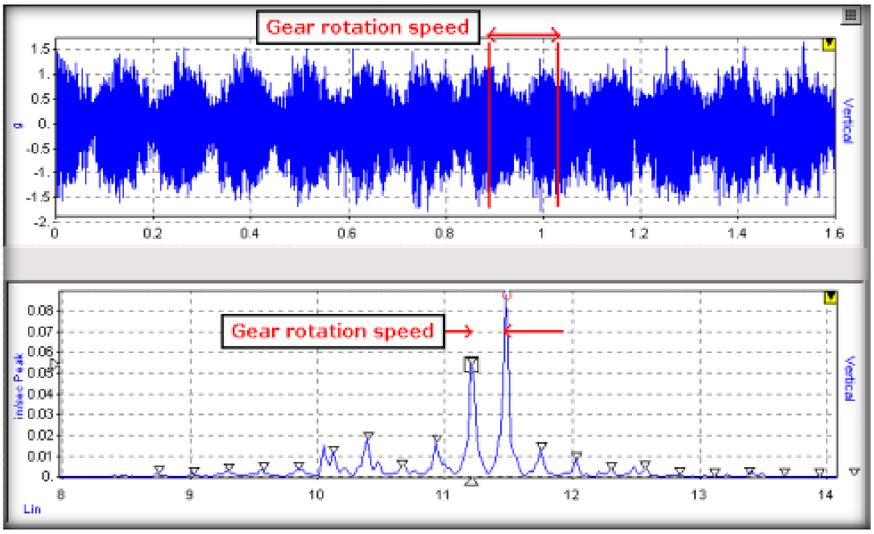
١-٩-٢- يوجد العديد من الحالات "conditions" التى يتم التأكد منها بشكل جيد بالنظر فى الشكل الموجى

وبالمثل، هناك العديد من المشاكل التي يتم كشفها من خلال بصمة الإهتزازات، ولكن يتم التأكد منها بشكل جيد من خلال إستعراض الشكل الموجى.

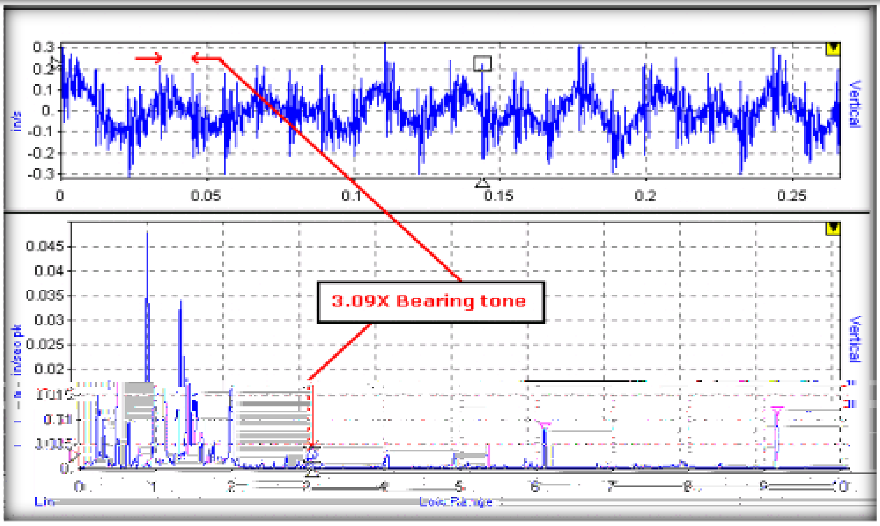
فمثلاً، بالرغم من أن التفكك "looseness" يظهر كتوافقات "harmonics" لسرعة الدوران فى البصمة. فإنه يوجد أسباب أخرى رغم ذلك تجعلنا ننظر إلى تلك التوافقات بالشكل الموجى. حيث أن إستعراض الشكل الموجى قد تكشف عن وجود (impacts/transients) عشوائية، وهذا علامة إثبات بوجود تفكك.



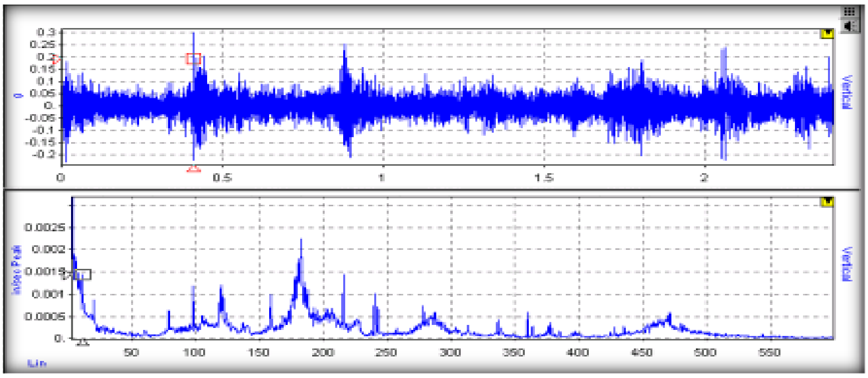
التآكل فى التروس "Wear in gears" يظهر أيضاً فى بصمة الإهتزازات " visible in the spectrum" كقمة "peak" عند تردد تعشيق التروس "gearmesh frequency" ومصاحبة لها ترددات جانبية "sidebands" من سرعة دوران الترس المتسبب في المشكلة (offending gear). يكون كل ذلك واضحاً فى البصمة، ولكن درجة الضرر "damage" من الأفضل تقييمه من خلال إستعراض الشكل الموجى "time waveform".



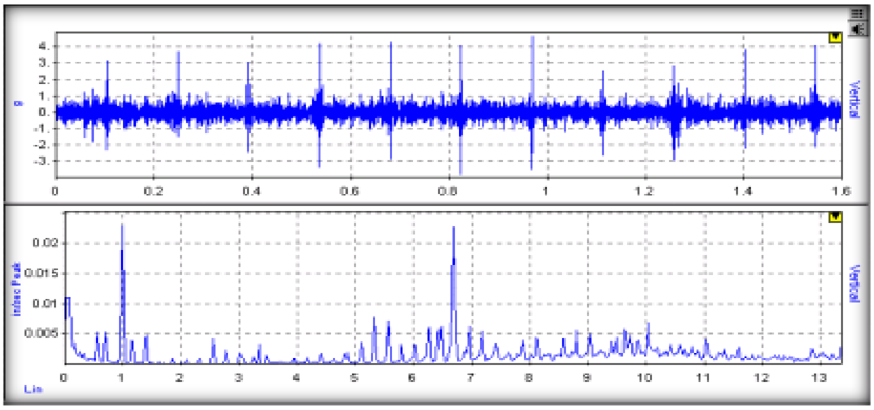
إذا كانت الجلبة الداخلية لرولمان البللى "inner race" بها نقر أو شرخ "pitted or cracked"، سوف يحدث صدمات "impacts" عند معدل سرعة الدوران للجلبة الداخلية لرولمان البللى " inner race rotation rate"، ويحدث أيضاً "modulation" تبعاً لتحرك الشرخ "crack moves" داخل أو خارج منطقة الحمل "load zone". وغالباً ما نرى أيضاً "sidebands" فى البصمة، ومع ذلك فإن الشكل الموجى يعطى أيضاً مؤشراً واضحاً "clear indication".



مثلاً، يمكن أن ترى إنفجارات من الطاقة "bursts of energy" بسبب التكهف "cavitation" أو قوة دخول الهواء "air ingestion" إلى الطلمبة. والتحدبات "humps" الموجودة بالبصمة هى نتيجة، ولكن مرة أخرى نقول أن الشكل الموجى يعطى أفضل مؤشر.



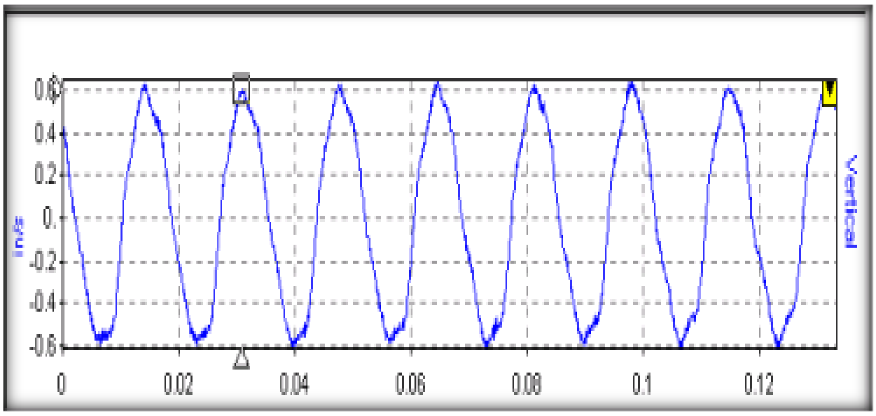
في هذا المثال، لدينا مشكلة فى سيور نقل الحركة "belt fault". بالرغم من وجود التوافقات "harmonics" في البصمة "spectrum" ولكن المشكلة واضحة أيضاً للعيان في الشكل الموجي "time waveform".



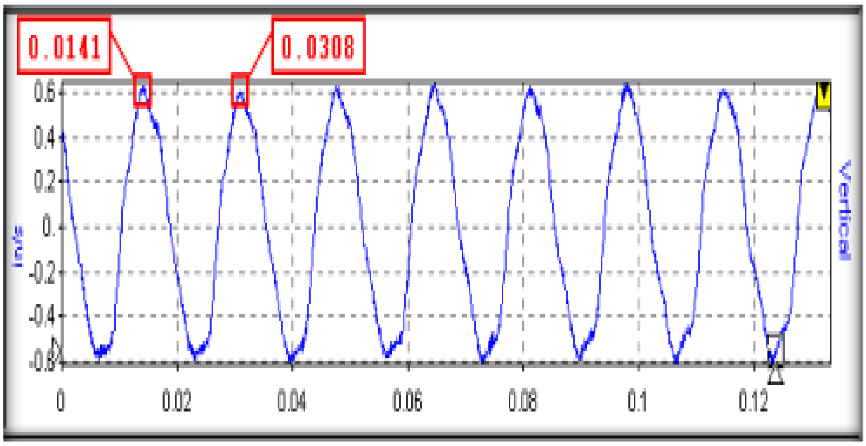
١-٩-٣- إستخدام الشكل الموجي لحساب الزمن والتردد للمساعدة على فهم ما يجرى داخل الماكينة

تعلمنا سببين لأهمية إستعراض الشكل الموجي ولكن نحتاج أيضاً إلى تحليل فعلى لها " actually analyze" وإستخراج المعلومات "extract information" التى يمكن إستخدامها فى التشخيص وسوف نتعرف على كيفية حساب الزمن بين حدثين "two events" ومنها يمكننا حساب التردد "frequency" وبالتالى يمكننا التعرف على كل ما يحدث داخل الماكينة.

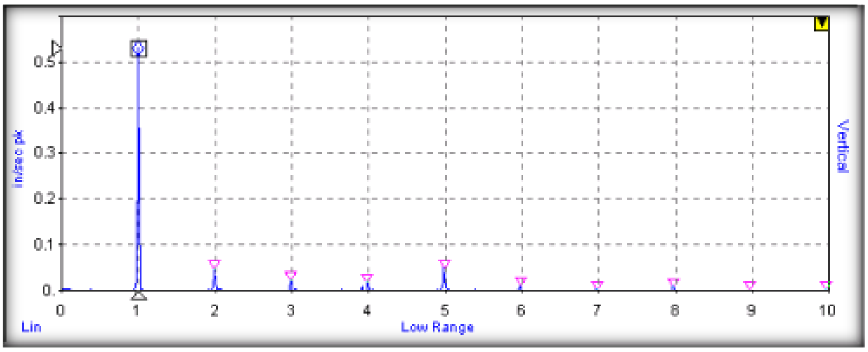
سوف نعطى أولاً مثال بسيط. يمكننا أن نرى بوضوح إشارة جيبية قوية " strong sinusoidal signal" بها نبضات "pulses" وإذا نظرنا إلى الزمن لأى إثنين من النبضات، وقمت بحساب الفرق فهذا هو الزمن بين حدثين. وإذا وضعنا المؤشر "cursor" على الشكل الموجى "time waveform" سوف نحصل على الزمن بالنسبة إلى بداية السجل "record". ولا يهمنا ما هو هذا الوقت، ولكنه يسمح لنا بقياس فارق التوقيت بين حدثين.



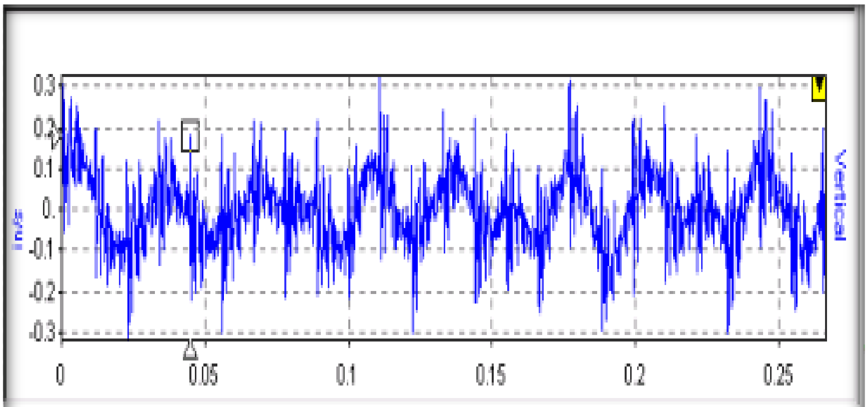
دعنا نأخذ الزمن عند قمة دورتين متتاليتين "top of two cycles". فتكون العينة "samples" عند ٠,٠١٤١ ثانية و ٠,٠٣٠٨ ثانية . وتكون الدلتا "delta" (الفرق بين حدثين) هي ٠,٠١٦٧ ثانية. ونحن نعلم أن التردد "frequency" عكس "inverse" الفترة الزمنية "period" وبالتالى يكون (التردد = ١/٠,٠١٦٧) أو ٥٩,٨٨ هرتز أو ٣٥٩٣ سيكل/دقيقة.



وفى هذه الحالة نجد أن الماكينة فى هذا المثال تدور عند سرعة ٣٥٩٣ سيكل/دقيقة وبالنظر إلى بصمة الإهتزازات الآتية يمكننا أن نرى قمة واضحة عند هذا التردد كما كنا نتوقع.



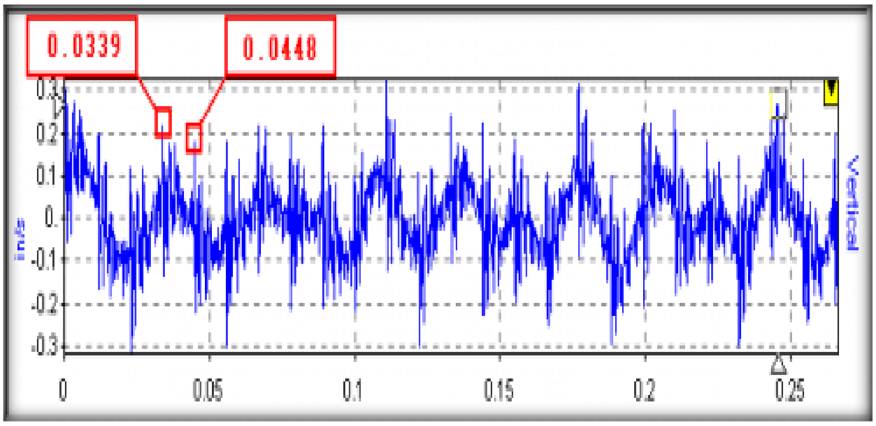
وإذا نظرنا إلى شكل موجى معقد بعض الشئ وقمنا بنفس العمل السابق على العينة السابقة، وحسبنا الفرق الزمنى لأى إثنين من النبضات، فهذا هو الزمن بين حدثين.



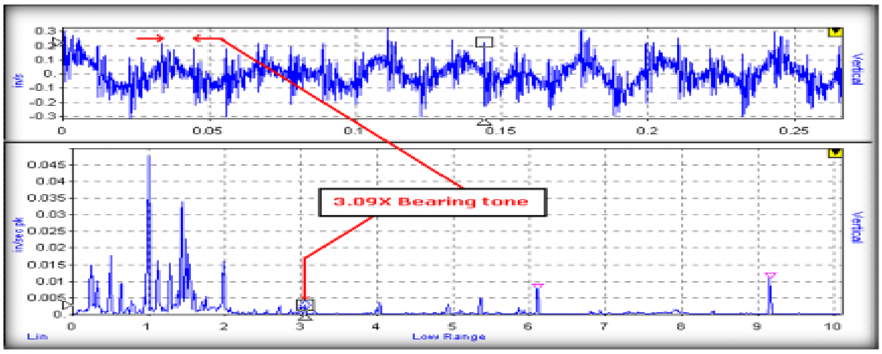
The data is from June 1, 1999 from the Motor, vertical.

فى هذه الحالة نجد أن الفرق هو ٠,٠١٠٩ ثانية وهذا يشير إلى الفترة الزمنية "period" لهذه الإشارة "signal".

وبالتالي فإن (التردد=١/٠,٠١٠٩) أو ٩١,٧٤ هرتز (٥٥٠٤ سيكل/دقيقة). سرعة تشغيل هذه الماكينة هو ١٧٧٦ سيكل/دقيقة ، أى هذه الإشارة تساوى ٣,٠٩٩ X من سرعة التشغيل.



فى بصمة الإهتزازات نجد أيضاً قمة "peak" عند هذا التردد. وفى هذه الحالة كان يجب علينا التحقق "verification" – أى يوجد قمة عند نفس التردد فى بصمة الإهتزازات. وهذا ليس هو الحال دائماً، وهذا يبين أن هذه الطريقة مفيدة جداً.



مما سبق رأينا أننا أمكننا التعرف على الأنماط "patterns" فى الشكل الموجى، وإجراء العمليات الحسابية للمساعدة على فهم ما يجرى داخل الماكينة.

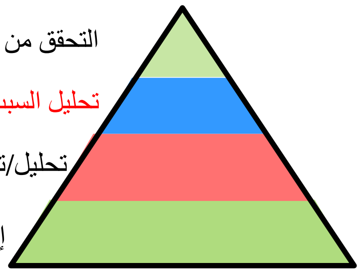
القسم الخامس:- مرحلة تحليل السبب الجذري للمشكلة

١- المرحلة الثالثة:- تحليل السبب الجذري للمشكلة "The root cause analysis phase"

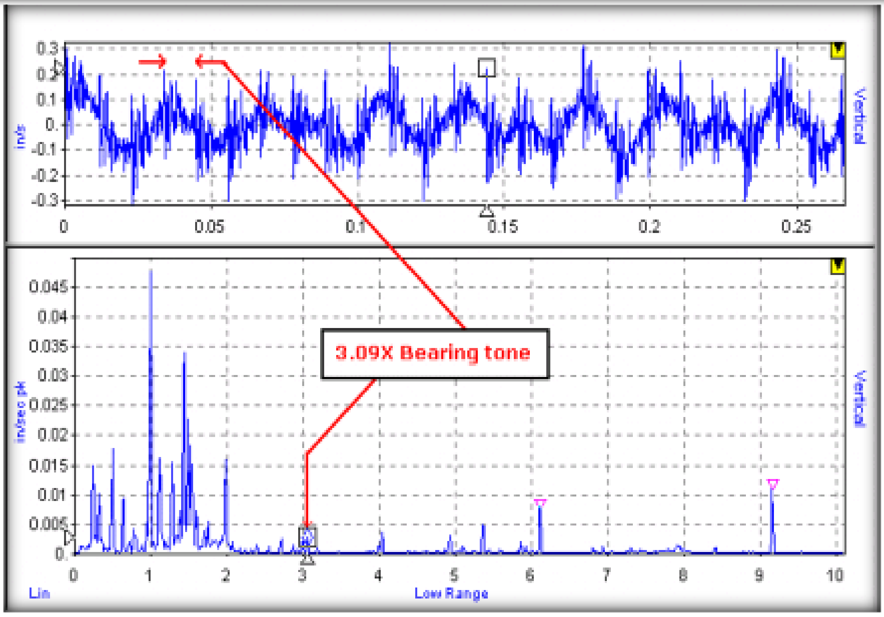
وبعد تحليل وتشخيص المشكلة علينا مواصلة مراقبة الماكينة بإستخدام نفس مجموعة الأدوات المستخدمة فى تحليل الإهتزازات لمعرفة السبب الجذرى للمشكلة ولماذا تطورت المشكلة. وكتابة توصيات جديدة إضافية مع التوصيات السابقة "recommendation" لإجراء التغييرات اللازمة لتجنب حدوث المشكلة مرة أخرى.

ويجب على مهندس مراقبة وتحليل الإهتزازات أن يبحث عن أسباب حدوث المشكلة فمثلاً على سبيل المثال غالباً ما ينهار رولمان البللى نتيجة عدم الإتزان أو عدم السنترة وبالتالى نحتاج لمعرفة الأسباب الجذرية للمشكلة لمعرفة ما إذا كانت الماكينة غير متزنة من الأساس أو نتيجة عملية التشغيل وعمل الإجراءات التصحيحية لضمان تصحيح مصدر المشكلة.

وعلى هذا يمكن القول بأن فهم الأسباب الجذرية للمشكلة وإتخاذ الإجراءات اللازمة لضمان تصحيح المصدر الرئيسى للمشكلة يتيح للماكينة العمل لفترة أكبر وتصبح موثوق بها والإعتماد عليها كأحدى الماكينات الدوارة بالمصنع.



إستخدمنا سابقاً تقارير إستثنائية "exception reports" للكشف عن المشاكل التى يمكن وجودها بالماكينات، وإستخدمنا مجموعة من الأدوات لتحليل بيانات الإهتزازات لإكتشاف المشاكل وتشخيص "diagnosis" طبيعة وحدة المشكلة وتحديد حالة المعدات لإمكانية أخذ إجراء مناسب خلال تنفيذ أعمال الصيانة.



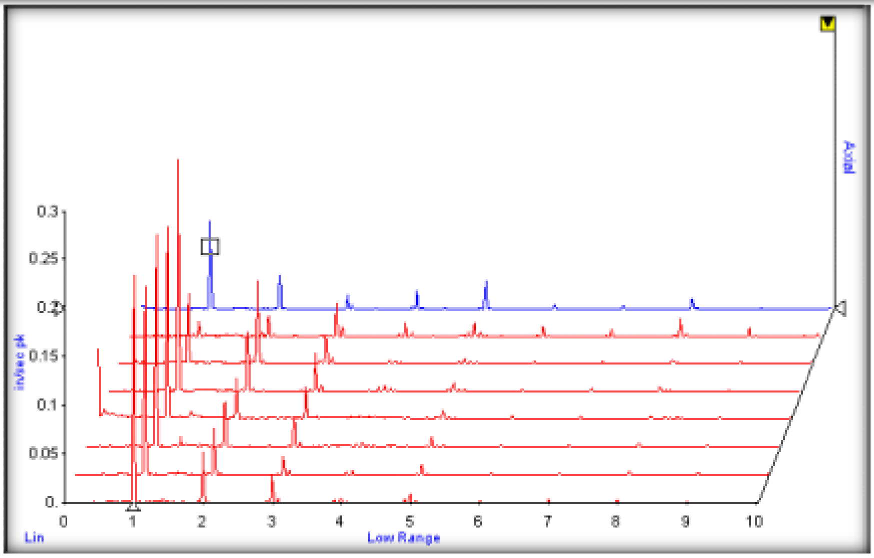
فمثلاً إذا إنهار رولمان البللى فإننا نرتب لإحلاله من خلال التخطيط لأعمال الصيانة. ولكن ما هو السبب الجذرى "root cause" لإنهيار رولمان البللى؟ فإذا تم معرفة السبب وأخذنا الإجراء اللازم لإزالة السبب فإن الماكينة عندما تعود للخدمة تستمر فى العمل لفترة أطول. وهذا ما يسمى بتحليل السبب الجذري للمشكلة.

ولن نناقش كافة الاختبارات الممكنة للمساعده فى التعرف على السبب الجذري لمشكلة الماكينة، ولكن سوف نناقش بعض المبادئ الهامة.

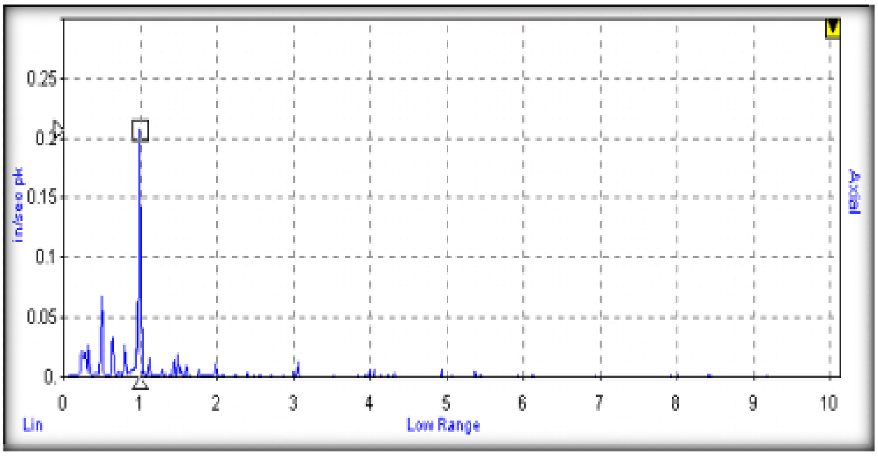
١-١- التحقق من السجل التاريخى للبيانات "history of data"

تحدث مشاكل كثيرة فى الماكينات نتيجة كل من الرنين "resonances"، عدم الإتزان "imbalance" عدم ضبط المحاور "misalignment" أو التفكك الميكانيكى " Mechanical looseness". وإذا أمكننا إكتشاف وحل هذه المشاكل فى وقت مبكر ستكون هذه الماكينات أقل عرضة لحدوث مشاكل أخرى.

وإذا رجعنا للوراء من خلال بيانات مراقبة الإهتزازات "condition monitoring data" فى الأشهر القليلة الماضية، سوف نجد علامات "signs" على بداية إنهيار رولمان البللى، ولكن قبل ذلك بكثير كانت هناك علامات على عدم الإتزان "imbalance" أو عدم ضبط المحاور "misalignment". وقد نشاهد أيضاً وجود أدلة على الرنين "resonance".



فمثلاً، إنهيار رولمان بللى (على الموتور) بعد يومين من إجراء آخر قياس. ومع ذلك، إذا نظرنا إلى الوراء فى أقرب قياس للإهتزازات سوف تجد قمة عالية فى الإتجاه المحورى عند سرعة الدوران (1X axial) مما يشير إلى عدم السنترة أو وجود رفة "runout" فى الطنبورة "sheave" تسبب فى هذا الإنهيار.



ومثلاً إذا كانت الماكينة مفكوكة المسامير "missing hold-down bolt"، فتكون قاعدتها مرنة ومتحركة "foundation flexibility"، وتسبب إنهيار رولمان البللى.



رولمان البللى لا ينهار من تلقاء نفسه. إلا إذا كانت هناك مشكلة التشحيم "lubrication problem" وهناك بعض القوى الأخرى المعنية والتى قد تسبب الضرر. وإذا قمنا بتحديد مصدر (الإهتزازات) وحاولنا تقليله فإن الماكينة ستصبح أكثر موثوقية "reliable".

من الممكن أن لايكون لديك متسع من الوقت للنظر فى البيانات القديمة، ولكن يمكنك الخروج للتحدث مع أفراد التشغيل والصيانة لمعرفة المزيد عن تاريخ الماكينة.

وبالإضافة إلى ذلك، فإنه فى المرة القادمة إذا رأيت دليل على عدم الإتزان، عدم السنترة أو الرنين، لا تهمل ذلك حتى لو أن المستويات ليست مرتفعة جداً. إذا أمكنك قياس ذلك، فإنه يتسبب فى إجهادات عالية "excess strain" على رولمان البللى – هذه الإجهادات قد تؤدى إلى إنهياره.

١-٢- النظرة الشاملة لإهتزازات الماكينة "Look at the big picture"

في بعض الأحيان سوف تأتي القوة المدمرة من ماكينات أخرى. هذا ينطبق بشكل خاص على الماكينات التى لاتعمل دائماً (الإحتياطية). وهى واقفة تنتقل لها الإهتزازات من الماكينات المحيطة ومن الممكن أن تسبب الضرر لرولمان البللى. هناك قصص لاتحصى من أن الماكينة لم تستخدم لأسابيع، وكان تعمل جيداً فى آخر تشغيل لها، وإنهارت فى بدء التشغيل.

ولحل هذه المشكلة نتبع الآتى:-

١- الحفاظ على دوران العمود "Keep the shafts turning".

٢- البحث عن طرق لعزل الإهتزازات "Look for ways to isolate the vibration".

٣- لا تجعل الماكينات إحتياطية لفترة طويلة "Don’t spare machines for so long".



الطلمبات المغمورة "Submerged pumps" التى لها أعمدة طويلة "long shafts" من ممكن يحدث لها رنين عندما لا تعمل – وعند إعادة تشغيلها، من الممكن أن ينهار الذراع "boom".

فى بعض الأحيان من الممكن إلقاء نظرة إلى الطرق المستخدمة لتخزين الماكينة أو أجزائها عندما لا تستخدم. رولمان البللى ممكن أن يتلف وهو موضوع على الرف.

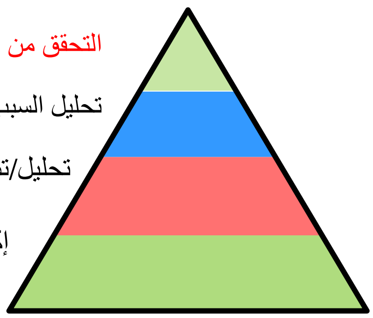
يجب النظر إلى خطوات "repair procedures" الإصلاح العديد من عيوب الماكينات يمكن إرجاعها "traced back" إلى آخر إصلاح "last repair". العجلة أو التسرع "Haste"، ضعف التدريب "poor training"، وعدم وجود رقابة الجودة "lack of quality control" يمكن أن يؤدي إلى إستخدام ماكينات لا يمكن الاعتماد عليها "unreliable machinery".

يجب عليك أن تنظر أيضاً في المسائل المتعلقة بالتصميم "design issues". وإذا إستخدمت الماكينة للغرض الذى تم تصميمها من أجله وتم تشغيلها بالحمل المطلوب فمن الممكن أن يؤدى عامل الهيكل الخرسانى "structural factors" وخلافه إلى وجود رنين "resonances".

لكل مشكلة لها حل ومع أى مشكلة تحتاج إلى إجراء تصحيحى وتكاليف مترتبة على ذلك (مسألة مالية) فلا تجعل ذلك أن يحبطك. فقط سوف تحتاج إلى تبرير التكلفة "cost justification" لعمل التغيير المقترح وتقدير الوفر المباشر والغير مباشر الناتج عن ذلك.

ومن السهل الشكوى بعدم وجود وقت كافى للكشف عن كل الأسباب الجذرية لمشاكل الماكينات "root cause". ولكن يوجد مميزات لك ولشركتك. فالماكينات ذات الموثوقية " Reliable machines" تخفض تكاليف الصيانة "lower maintenance costs". وإنخفاض التكاليف تعنى تحسين الربحية "improved profitability" وتعنى المزيد من الأمن الوظيفى "job security".

٢- المرحلة الرابعة:- التحقق من الإصلاح "verification"



وأخيراً وبعد إكتمال الإصلاح أو الصيانة تأتى المرحلة الرابعة والنهائية وفيها يتم التحقق من الإصلاح "verification" والتأكد من حل المشكلة وعودة الماكينة للخدمة بالشكل الصحيح وذلك فى الحالات الآتية:-

١- أى مرة يتم فيها الإصلاح سواء نتيجة عطل كارثى "catastrophic failure"، صيانة مخططة "planned maintenance"، أو إصلاح نتيجة التحليل والتشخيص "diagnosis"، الماكينة يجب إختبارها فى كل الأحوال قبل إرجاعها إلى الخدمة.

٢- الماكينة مراراً وتكراراً سوف تتعطل بعد الإصلاح. سواء كان من خلال إستخدام أجزاء غير صحيحة "incorrect parts" أو أجزاء تم تركيبها بشكل غير صحيح "installed incorrectly"،

سوء التشحيم "poor lubrication"، أو الأجزاء المعيبة "faulty parts" (إنهيار رولمان البللى نتيجة الإجهادات)، والحقيقة هى أنه يوجد إحتمالات كبيرة للعطل "high probability" بعد الصيانة مباشرة.

ولذلك، عندما تعود للخدمة، يتم أخذ قياسات إضافية للتأكد من أن المشكلة الأصلية التى تم إكتشافها تم إصلاحها وأن مستوى الإهتزازات وشكل البصمة لا يشير إلى وجود مشاكل جديدة وذلك للأسباب الآتية:

١- للأسف في كثير من الأحيان يتم عودة الماكينة للخدمة مرة أخرى بعد الإصلاح وبها بعض المشاكل مثل عدم السنترة أوعدم تثبيت مانع التسريب "seals" بالشكل الصحيح، أو أن التزييت غير مناسب .... إلخ. ومن المعروف أن إحتمالات وجود مشاكل بعد الصيانة تكون عالية جداً.

٢- التشخيص قد لا يكون صحيحاً. ربما تم ضبط محاور المعدة تبعاً للتوصيات، ولكن بعد ذلك مستوى الإهتزازات وشكل البصمة ليس أفضل من ذى قبل. الإنسان يمكن أن يخطئ، ولكن لا معنى لذلك إلا من التحقق من أن الإجراءات التى إتخذت كانت الإجراء الصحيح.

٣- واخيراً، التشخيص الخاص بك قد يكون صحيحاً، ومجموعة الإصلاح تعاملت مع هذه المشكلة، ولكن من الممكن بسهوله أن تتولد مشكلة جديدة. لذلك يتم عمل إختبار دقيق للتأكد من الماكينة تعمل بحالة جيدة وأنه قد تم تثبيتها بالشكل الصحيح وإعتماده على حالة الماكينة وأهميتها يمكن متابعتها وذلك بإعادة قياسها مرة أخرى فى غضون أسبوع فقط للتأكد من أنها تعمل بحالة جيدة، وبعد هذا يتم قياسها تبعاً للخطة الزمنية الخاصة بها.

- النهاية -

الباب السادس

تشخيص أعطال الماكينات

Machinery Fault Diagnosis



أقسام الباب السادس

١– القسم الأول : تشخيص الأعطال الشائعة (الأربعة الكبار)

٢– القسم الثانى : تشخيص المشاكل الآخرى للماكينات الدوارة

٣– القسم الثالث : القوى الهيدروليكية والهوائية

٤– القسم الرابع : توربينات الغاز والبخار

٥– القسم الخامس : المحركات الكهربائية

مقدمه:-

سوف نتعلم أخيراً فى هذا الباب كيفية تشخيص مشاكل الماكينات. ولقد ناقشنا إستخدام البيانات من محاور مختلفة (الرأسية والأفقية والمحورية) لمعرفة حركة الماكينة، وناقشنا كيف أن خاصية مثل التفكك "looseness" والصدمات "impacting" والتحوير "modulation" ينتج عنها ترددات "sidebands" وتوافقات "harmonics" فى بصمة الإهتزازات "spectrum".

ناقشنا أيضاً الترددات القسرية، وكيف أن الأجزاء الدوارة (الأعمدة والريش والتروس) ينتج عنها ترددات فى كل من الشكل الموجى والبصمة.

وسوف نقوم بربط كل هذه المعلومات ومعرفة كيفية إستخدام تلك المعرفة لتشخيص خلل الماكينات.

فى هذا الباب سوف نقوم بتغطية عدد كبير من المشاكل المختلفة. وإذا كنت جديد فى تحليل الإهتزازات فيمكنك العودة لهذا الباب لتنشيط ذاكرتك لمعرفة خطأ محدد.

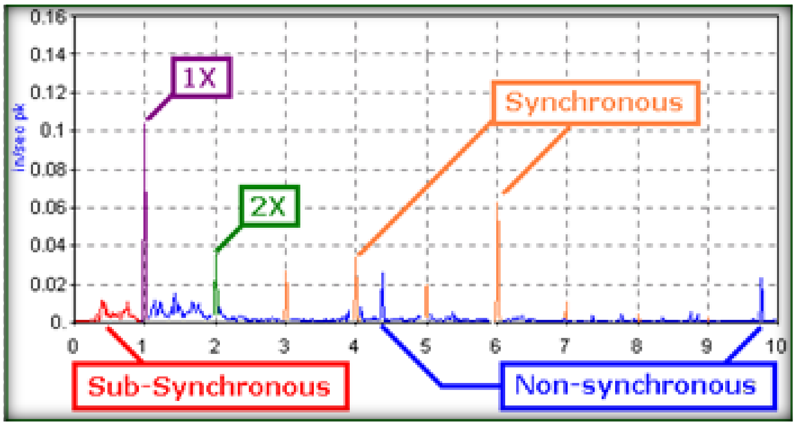
١- الطرق الثلاثة لتسهيل أسلوب عملية التشخيص:-

١-١- دراسة أو فهم بصمة الإهتزازات "Understand the spectrum"

١-٢- فهم الماكينة "Understand the machine"

١-٣- التركيز على المشاكل الكبيرة الشائعة

١-١- دراسة أو فهم بصمة الإهتزازات "Understand the spectrum"



يمكنك محاولة بناء صورة عما يجب رؤيته عند تحليل البصمة. يمكنك تصنيف ماتشاهده وتنسبه إلى سلسلة الأخطاء المعروفة:-

+ قمة عالية "peaks" عند ١ X

+ قمة عالية "peaks" عند ٢ X

+ توافقات عند ١ X

+ وجود ترددات جانبية "sidebands"

+ قمم "peaks" متزامنه مع سرعة الدوران "synchronous"

+ قمم "peaks" غير متزامنه مع سرعة الدوران "Non-synchronous"

+ قمم "peaks" فرعيه من سرعة الدوران "Sub-synchronous"

+ قمم "peaks" إتجاهيه جداً "Very directional" (أى فى أحد المحاور وليس فى الآخرى)

١-١-١- الترددات الفرعية من سرعة الدوران "Sub-synchronous"

وهى الترددات الأقل من سرعة الدوران (1 order) وتقع فى بصمة الإهتزازات فى المنطقة الأقل من سرعة الدوران للماكينة (X١) (كسر أقل من واحد order). والأعطال الموجودة فى هذه المساحة عبارة عن مشاكل عدم إستقرار دوامة الزيت "Oil Whirl" وترددات الغويشة لرولمان البللى "cage frequency" وتردد السيور "belt frequency" والإضطراب "turbulence" ومؤشرات الإحتكاك "rub" والتفككات الشديدة "severe looseness".

١-١-٢- الترددات (القمم) المتزامنة مع سرعة الدوران "Synchronous components"

وهى مضاعفات العدد الصحيح لسرعة الدوران (1 order). ويوجد العديد من الأعطال الموجودة فى هذه المنطقة عبارة عن مشاكل عدم الإتزان "imbalance" وعدم السنترة "misalignment" والتفكك "looseness" وإنحناء الأعمدة "bent shaft" و تآكل الريش "vane - blade" وتعشيق التروس "gear mesh" وغيرها.

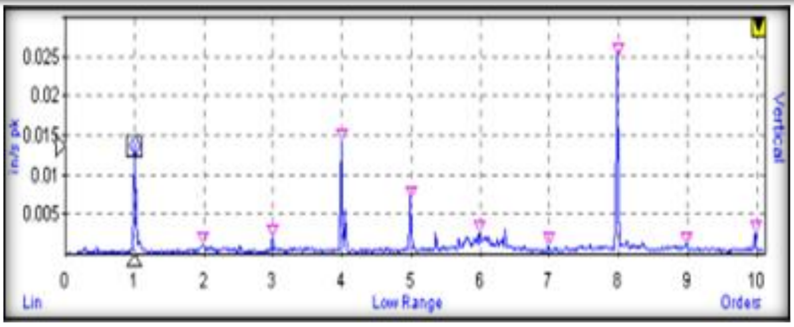
١-١-٣- الترددات (القمم) غير المتزامنة مع سرعة الدوران "Non-synchronous"

وهى مضاعفات غير صحيحة من سرعة الدوران (1 order) (كسر أكبر من واحد order). ويوجد العديد من الأعطال الموجودة فى هذه المنطقة عبارة عن مشاكل رولمان البللى " rolling element bearings" وترددات لأعمدة أخرى مختلفة مقاده "driven" والتوافقات لترددات الأقل من سرعة الدوران (Sub-synchronous) وترددات الرنين (resonances) والضوضاء الصادرة من ماكينات أخرى والتكهف "Cavitation" وغيرها.

١-٢- فهم الماكينة "Understand the machine"

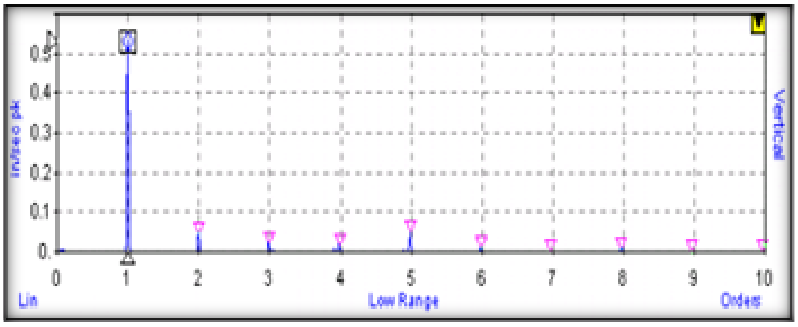
طريقة أخرى للإقتراب من عملية التشخيص هو محاولة الحصول على فهم جيد لما يحدث داخل الماكينة. وإذا كنا قد فهمنا حالات الأعطال، فإننا سوف نفهم بشكل أفضل ما يجب أن نتوقعه فى بصمة الإهتزازات.

إذا كان فهمك سليم وجيد لمشاكل الماكينات فإنك لن تكون منزعج عندما لا تكون البصمة غير مشابهه للقواعد المثالية كما فى حالات عدم الإتزان وعدم السنترة .... إلخ. إذا فهمت المشاكل المختلفة للماكينات وفهمت كيفية مزج الإشارات مع بعضها البعض وفهمت القياسات ونظام معالجة الإشارات سوف تكون فى وضع أفضل لتشخيص الأعطال.



١-٣- التركيز على المشاكل الكبيرة الشائعة

وأخيراً، عند البدء فى تحليل الإهتزازات يمكنك التركيز على المشاكل الكبيرة والتى من المحتمل أن تواجهها ومع مرور الوقت يمكنك دراسة مشاكل أخرى أقل شيوعاً.



والمشاكل الكبيرة غالباً مايشار إليها بإسم الثلاثة الكبار "big three" وهى عدم الإتزان وعدم السنترة ومشاكل رولمان البللى وهناك من يسميها الأربعة الكبار "big four" بإضافة التفكك إلى القائمة.

١- عدم الإتزان "Imbalance"

٢- عدم السنترة "Misalignment"

٣- التفكك "looseness"

٤- مشاكل رولمان البللى "rolling element bearings"

آخرون لا يزالون يفضلون التركيز على السبب الجذري للعديد من المشاكل وبالتالي إضافة الرنين "Resonance" إلى القائمة التى يجب أن نفهمها.

يجب عليك التفكير فى الماكينات التى فى مصنعك (ومعرفة أسباب المشاكل السابقة) والتأكد من أنك مستعد للتعامل مع هذه المشاكل فى المستقبل.

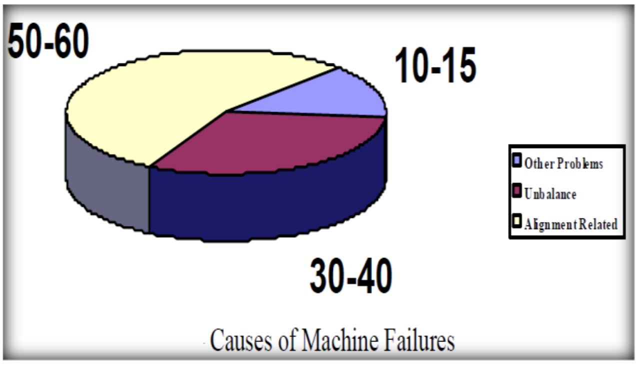
على سبيل المثال إذا كان هناك إحدى التوربينات الكبيرة يجب عليك دراسة كل من دوامات الزيت "oil whirl" وخفقان الزيت "oil whip".

ويجب أن تتذكر دائماً أن الماكينة لها أكثر من مشكلة. على سبيل المثال إذا وجد عدم الإتزان فى ماكينة لبعض الوقت فمن الممكن أن يحدث مشكلة برولمان البللى ويبدأ فى الإنهيار ومن الممكن أيضاً حدوث مشكلة فى أرضية الماكينة "foundation flexibility problem". وبالتالى يجب أن تتأكد وأنت تحلل ما بداخل الماكينة البحث عن كل المشاكل، وإستخدام هذه المعلومات فى المساعدة على أخذ الإجراء المناسب ليس فقط لإصلاح الماكينة ولكن أيضاً لضمان عدم تكرار المشاكل مستقبلاً.

القسم الأول:- تشخيص الأعطال الشائعة (الأربعة الكبار)

مقدمه:-

يتفق معظم الخبراء ومحللى الإهتزازات والممارسين والمدربين أن عدم الضبط الدقيق للمحاور "misalignment" والمشاكل ذات الصلة هى السبب الرئيسى لمشاكل الماكينات الدوارة ومن المسلم به أن هذه المشاكل فى حدود ٦٠-٧٠٪ من مشاكل حالات الإهتزازات، وأن مشاكل عدم الإتزان "unbalance" تمثل نسبه فى حدود ٣٠-٤٠٪ من مشاكل الماكينات الدوارة، وأما المشاكل الآخرى للماكينات الدوارة فهى فى حدود ١٠-١٥٪. ولكن ذلك بالطبع يختلف من صناعة إلى أخرى.



وبالتالى الإهتمام بمشكلة عدم السنترة وعدم الإتزان تكون خطوة مثمرة للغاية لبدء أى برنامج للموثوقية "reliability"، لتوفير أكثر من ٧٠٪ من التكاليف المتعلقة بأعطال الماكينات الدوارة.

وفيما يلى ترتيب لأكثر أربع مشاكل للماكينات الدوارة "Top four machine faults":-

١- عدم الإتزان "unbalance".

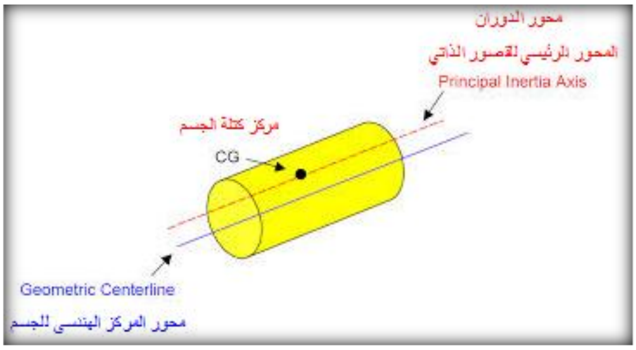
٢- عدم السنترة "misalignment".

٣- التفكك الميكانيكى "mechanical looseness".

٤- إنهيار رولمان البلى "bearing failure".

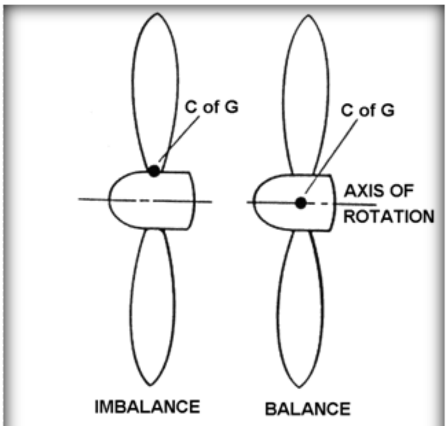
١- الإتزان "Unbalance"

مقدمه:-



عدم الإتزان أو التوزيع غير المتكافئ للكتلة حول محور الدوران. ويحدث عندما يكون محور المركز الهندسى للجسم (خط الوسط الطبيعى للروتور باللون الأزرق) غير متطابق مع المحور الرئيسي للقصور الذاتي (باللون الأحمر) مع العلم بأن مركز كتلة الجسم أومركز الثقل " center of gravity" يمر بالمحور الرئيسى للقصور الذاتي كما بالشكل.

وفى الواقع هذه المراكز لن تتطابق أبداً ولكن الهدف من عمل الإتزان للروتور هو تقليل مقدار عدم الإتزان حتى لا يتأثر سلباً بوجود نسبة عدم الإتزان المتبقية "residual unbalance".



Propellers in Un-Balanced & Balanced States

فى الروتور تنتج بسبب قوة القصور الذاتى "inertia forces" المصاحبة أوالمرتبطة بالكتل المتحركة.

إذا كانت هذه الكتل المتحركة ليست متزنة بشكل صحيح، فإن القوة الديناميكية تسبب زيادة الحمل على رولمان البللى أكبر من مواصفات التصميم مما يؤدى إلى إنهيار سابق لأوانه لرولمان البللى وتسبب زيادة الإجهادات فى كل أجزاء الماكينة، وتسبب أيضاً إهتزازات غير مقبولة وخطيرة.

وتتحقق تقنية الإتزان من خلال تغيير مكان "location" مركز كتلة الجسم "mass centers" مع والمركز الهندسى "geometric center" بما فيه الكفاية لتلبية معايير الإتزان القياسية المحددة سلفاً ولكن سيبقى هناك دائماً نسبة متبقية من عدم الإتزان.

ملحوظة:-

١- محور الدوران "Rotating centerline":- هو محور دوران الروتور إذا كان غير مقيد "constrained" بكراسى التحميل ويمر بمركز الثقل "center of gravity (CG)". ويسمى أيضاً المحور الرئيسي للقصور الذاتى "Principle Inertia Axis or PIA".

٢- خط الوسط الهندسى "geometric centerline":- هو خط الوسط الطبيعى للروتور.

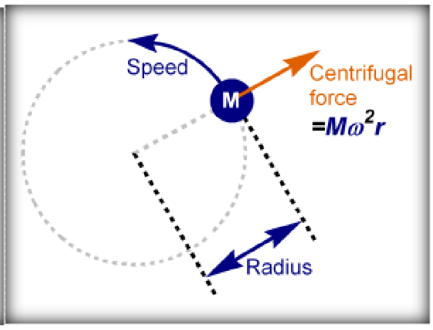
٣- عندما يكون كل من محور الدوران وخط الوسط الهندسى متطابقين "coincident" يكون الروتور فى حالة إتزان وإذا كانا متباعدين "apart" يكون الروتور فى حالة عدم إتزان.

٤- الأنواع المختلفة من عدم الإتزان تحددها العلاقة بين هذان الخطان (محور الدوران وخط الوسط الهندسى).

١-١- قوة الطرد المركزي "centrifugal force"

قوة الطرد المركزي "centrifugal force" هي إحدى القوى الأساسية للإثارة في الآلات الدوارة وهى تنشأ من عدم الإتزان وتُسمّى أيضًا قوة رد الفعل المقابل لقوة الجذب المركزي (القوة المركزية).


حائط الموت تسلقة لدراجات النارية تعتمد على قوة الطرد المركزي



وتكون قوة الطرد المركزي "centrifugal force" مساوية للقوة المركزية "Central force" ولكن عكس اتجاهها وبالتالى تكون محصلة القوى تساوي صفراً، وهذا يعني حسب قانون نيوتن أن الجسم يجب أن يتحرك بخط مستقيم وسرعة ثابتة وليس في دائرة.

إذاً ما تفسير هذا الدفع بعيداً عن المركز، نحن نعلم أن للأجسام قصوراً ذاتياً "Inertia" (قانون نيوتن الأول "الجسم الساكن يبقى ساكن ما لم تؤثر عليه قوة تحركه والجسم المتحرك يبقى متحرك مالم تؤثر عليه قوة توقفه أو تغير من سرعته أو إتجاهه أو الإثنين معاً") يعني أن الجسم يقاوم التغير في السرعة سواءً كانت بالزيادة أو النقصان حيث تميل الأجسام المتحركة إلى الاستمرار في الحركة في سرعة ثابتة وفي خط مستقيم، ولذلك يميل الجسم المتحرك في مسارٍ دائري إلى الخروج عن مساره عند كل نقطة ليتحرك بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم غير أن القوة التي تسحبه في اتجاه المركز (القوة الجاذبة المركزية) تجبره على الاستمرار في مساره الدائري. ويمكن أن نستنتج أن الدفع إلى الخارج لا توجد قوة تسببه، إنما هو ناتج عن القصور الذاتي "inertia forces" للأجسام.

قانون قوة الطرد المركزية بدلالة السرعة الزاوية

قوة الطرد المركزية = الكتلة x عجلة قوة الطرد المركزية

$$F = ma_c$$

حيث:-

f = قوة الطرد المركزية "centrifugal force" نيوتن.

m = كتلة الجسم "mass" بالكيلو جرام.

a_c = عجلة قوة الطرد المركزية.

$$a_c = v^2 / r$$

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

v = السرعة (متر/الزمن).

r = المسافة بين محور الجسم ومحور الدوران بالمتر (نصف قطر الدوران "radius").

$$v = \omega \cdot \mathbf{r}$$

w: السرعة الزاوية "Angular speed".

$$F = mr\omega^2$$

١-٢- أسباب عدم إتزان العضو الدوار "Causes of Rotor Unbalance"

هناك عدد من الأسباب تجعل الماكينة غير متزنة. وبطبيعة الحال، إذا كانت الماكينة غير متزنة أصلاً بالشكل الصحيح، بسبب سوء التدريب أو عدم وجود المعدات المناسبة والوقت المناسب، فمن الطبيعي أن تبقى الماكينة غير متزنة وتسبب أضرار بموانع التسريب (seals) ورولمان البللى.

١- عدم وجود تجانس في المواد، إنتفاخات أو ثقوب "Blowholes" في أجزاء.

٢- عدم مركزية الدوران "Eccentricity" تحدث عندما يتم إزاحة "offset" مركز من خط الوسط الهندسي للطنبورة "sheave"، التروس "gear"، رولمان البللى "bearing" وإلخ.

٣- طول المفتاح غير مناسب "Improper key length".

٤- الإجهاد "Stress" الذى يؤدى إلى التشويه"distortion ".

٥- التآكل أو التآكل غير المنتظم "Corrosion or uneven wear".

٦- التشويه الحراري "Thermal distortion".

٧- تراكم الأوساخ (الرواسب) على ريش المروحة "build up" وتحرك الأجزاء " component shift".

٨- تصميم غير متماثل "assembly errors" وخطأ فى التجميع "assembly errors".

٩- تلف العضو الدوار أو تشققه "Cracked".

١٠- أخطاء العمل مثل إستخدام مسامير أو ورد للكوبلنج غير مناسبة "bolts or washers".

١١- تطاير الكتل التصحيحية للإتزان.

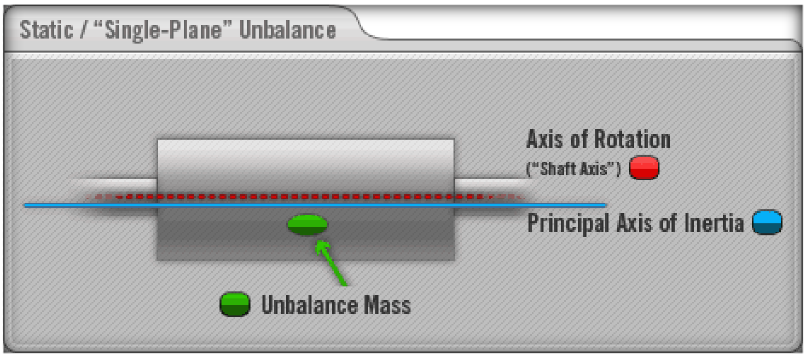
١٢- توزيع غير متساوى للكتل في الملفات الكهربائية.

١٣- أخطاء فى عملية التشكيل "Machining".

١-٣- أنواع عدم الإتزان "Types of Unbalance"

عدم الإتزان مشكلة شائعة بالماكينات وتزداد بزيادة قوة الدوران وتسبب إجهادات لا داعى لها على كلٍ من مانع التسريب "seals" ورولمان البللى. ويوجد ثلاثة أنواع من عدم الإتزان وهما عدم الإتزان الإستاتيكى وعدم الإتزان الزوجى وعدم الإتزان الديناميكى.

١-٣-١- عدم الإتزان الإستاتيكى "Static Unbalance"



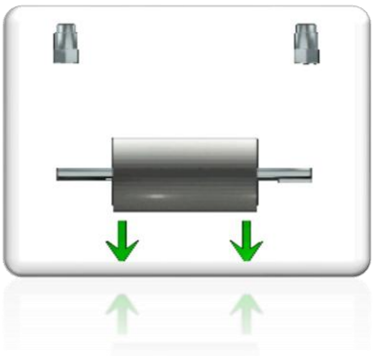
وفيه يكون محور المركز الهندسى للجسم (خط الوسط الطبيعى للروتور باللون الأزرق) موازياً للمحور الرئيسي للقصور الذاتي (باللون الأحمر) مع العلم بأن مركز كتلة الجسم " center of mass" ويسمى أيضاً مركز الثقل "center of gravity" يمر بالمحور الرئيسي للقصور الذاتي.

عدم الإتزان الإستاتيكى هو أبسط أنواع عدم الإتزان وهو عبارة عن بقعة ثقيلة على نقطة واحدة من الروتور.

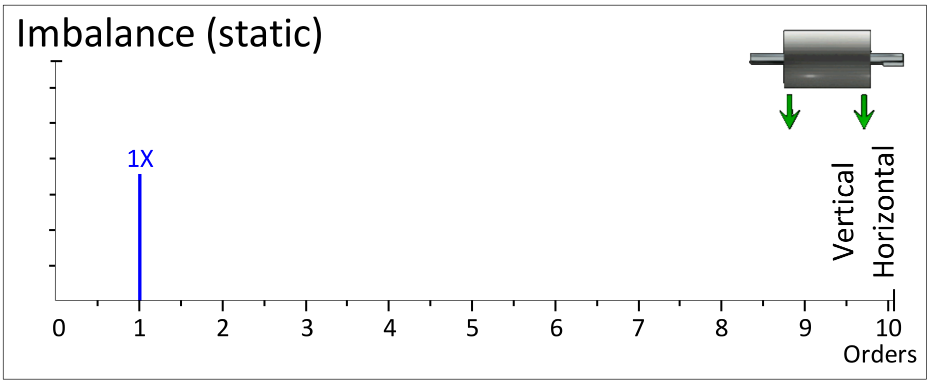
ويمر عبر مركز الثقل "center of gravity" (إنظر إلى الشكل العلوى).

ويسمى إستاتيك بسبب أنه يظهر حتى عند عدم دوران الروتور– واذا وضع هذا الروتور فى رولمان بللى خالى من الإحتكاك "frictionless" سوف يستمر الروتور فى الدوران إلى أن يأخذ وضع السكون وتكون البقعة الثقيلة فى الروتور فى أسفل الموضع.

عدم الإتزان الإستاتيكى ينتج عنه قوة (X١) على كلا رولمان البللى للروتور وتكون دائماً فى نفس الإتجاه. أى أن إشارات الإهتزازات الصادرة منهما يكونان فى نفس الإتجاه "in phase".



لتقليل أو منع عدم الإتزان الإستاتيكى، يتم ببساطة وضع أو إزالة "added or removed" كتلة فى مستوى واحد بحيث يتم تحريك مركز الثقل "center of gravity" مرة أخرى إلى محور الدوران.
وتجدر الإشارة إلى أن عدم الاتزان الإستاتيكى المبين بالشكل هو الحالة النظرية. ولتصحيح هذا النوع من عدم الإتزان يتم وضع كتلة تصحيحية واحدة، هذه الكتلة يجب وضعها فى مستوى عمودى على محور الدوران وماراً بمركز الثقل.



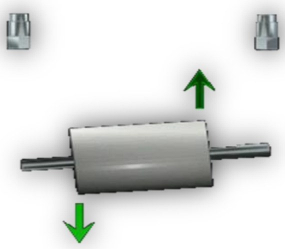
وعدم الإتزان الإستاتيكى النقى ينتج عنه قمة سرعة دوران قوية (X١) فى بصمة الإهتزازات، وسعتها تتناسب مع شدة عدم الإتزان ومربع سرعة الدوران (RPM). والمستويات النسبية لإهتزازات (X١) عند رولمان البللى تعتمد على مكان وجود البقعة الثقيلة على طول الروتور.

ملحوظة:-

عملياً نعتبر عدم الإتزان إستاتيكى عندما يكون قطر العمود "shaft diameter" (D) أكبر بكثير من طوله (L) (إذا كانت النسبة L/D ≤ ١٠ وهو ما يسمى بالعمود القصير "short shafts") أو عندما يتم وضع قرص واحد "single disc" على عمود طويل "long shaft" وبالطبع يكون سبب عدم الإتزان أساساً من هذا القرص وتضاف الكتلة التصحيحية للإتزان "balancing mass" على هذا القرص.

١-٣-٢- عدم الإتزان الزوجى "Couple Unbalance"

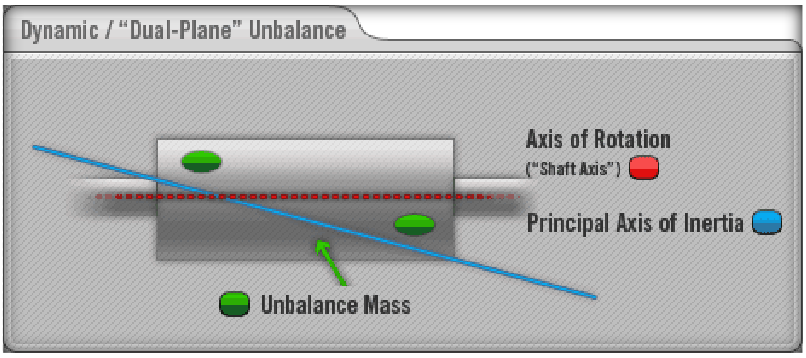
وفيه يكون محور المركز الهندسى للجسم (خط الوسط الطبيعى للروتور باللون الأزرق) يتقاطع مع المحور الرئيسي للقصور الذاتي (باللون الأحمر).
هذا النوع من عدم الإتزان يمكن فهمه على أنه كتلتان متساويتان وضعت على نصف القطر (rn)، وضعتا بشكل متناظر (إنظر إلى الشكل).
الروتور الذى به عدم الإتزان الزوجى قد يكون متزن إستاتيكياً (قد يبدو متزن تماماً إذا وضع فى رولمان بللى خالى من الإحتكاك). ولكنه لا يعبر عن نفسه إلا عند دوران الروتور وعندها يولد قوة طرد مركزى على رولمان البللى وفى إتجاهين متعاكسين.



وقوة الطرد المركزى الناتجة من كتلة عدم الإتزان ينتج عنها عدم الإتزان الزوجى "Couple" الذى يؤدى إلى إنحراف "deflects" المحور الرئيسى للقصور الذاتى "principal axis of inertia".

١-٣-٣- عدم الإتزان (العام) الديناميكى "Dynamic (General) Unbalance"

وفيه يكون محور المركز الهندسى للجسم "geometric center" (خط الوسط الطبيعى للروتور باللون الأزرق) يتقاطع "coincide" أو يتلامس " touch" المحور الرئيسي للقصور الذاتي "principal axis of inertia" (باللون الأحمر).



هذا النوع الأكثر شيوعاً من أنواع عدم الإتزان وهو مزيج من عدم الإتزان الإستاتيكى "static" والزوجى "couple". ويحدث ذلك عندما يصبح خطوط المحور الرئيسى للقصور الذاتى " principal axis of inertia" ومحور الدوران "axis of rotation" مائلة أو بها إنحراف "skew lines". هذا النوع من عدم الإتزان يمكن فهمه على أنه كتلتان مختلفتان (mn1) و(mn2) وضعت إعتباطى "arbitrary" على الروتور (إنظر إلى الشكل السفلى). قوتا الطرد المركزى "centrifugal forces" (D1) و(D2) الناتجة من كتلة عدم الإتزان تنشأ وترتفع "arise" بسبب هاتان الكتلتان أثناء الدوران.

وبدون معلومات قياسات زاوية الطور فمن الصعب التمييز بين عدم الإتزان الإستاتيكى وعدم الإتزان الديناميكى.

من أجل تصحيح عدم الإتزان الديناميكى، مطلوب عمل إتزان فى مستويات متعددة ويمكن تصحيح أو تعويض "compensate" تأثير هاتان الكتلتان عن طريق إضافة "added" أو إزالة "removed"

هاتان الكتلتان فى مستويين. حجم "size" ومكان "position" الكتل التصحيحية على الروتور يمكن معرفتها من خلال خطوات عمل الإتزان.

فى حين الإتزان الإستاتيكى يمكن تصحيحه فى مستوى واحد وبكتلة واحدة تصحيحية. والكتلة التصحيحية توضع فى الإتجاه المعاكس لعدم الإتزان.

١-٤- معايير الإتزان "Balancing Standards"

لقد وضعت عدة منظمات معايير لعمل الإتزان لإستخدامها على مختلف الماكينات. بعض الشركات تعمل على تطوير المعايير الخاصة بها. ولكن ما هو المعيار الذى يجب عليك إستخدامه؟ إختيار المعايير التى من شأنها أن تسمح لك بالمحافظة على العمر المطلوب للماكينة والمحافظة على وظائف المعدات إلى المستويات المطلوبة للعمليات الخاصة بها.

وفى الواقع قد تختلف المعايير وفقاً لمتطلبات المصنع.

عند عمل الإتزان فى الموقع "Field Balancing"، عادةً ما يتم الإتزان إلى أن تصل الإهتزازات إلى المستوى المطلوب لأنه من الأسهل تحديد مقدار مستوى الإهتزازات المطلوبة للماكينة عن طريق تحديد مقدار عدم الإتزان المتبقى "residual unbalance". الإهتزازات الناتجة بسبب عدم الإتزان تتناسب طردياً مع كمية عدم الإتزان.

إذا إنخفض مستوى الإهتزازات إلى المستوى المقبول بعد عملية الإتزان، فإن كمية عدم الإتزان المتبقية تصل أيضا إلى المستوى المقبول.

و نعلم أن سرعة الدوران تؤثر على القوى المركزية "centripetal" وبالتالي على مستوى الاهتزازات. حيث أن قوة عدم الإتزان تتناسب مع مربع السرعة (عندما يكون الروتور واقع عند أول سرعة حرجة). وبزيادة السرعة يزداد مستوى الإهتزازات. وبالتالى فإن المستوى المقبول (X١) يعتمد على سرعة الماكينة وحجمها. والجدول التالى يبين مستوى الإهتزازات للماكينات التى تعمل فى حيز تشغيل من ١٨٠٠ إلى ٣٦٠٠ دورة فى الدقيقة (RPM).

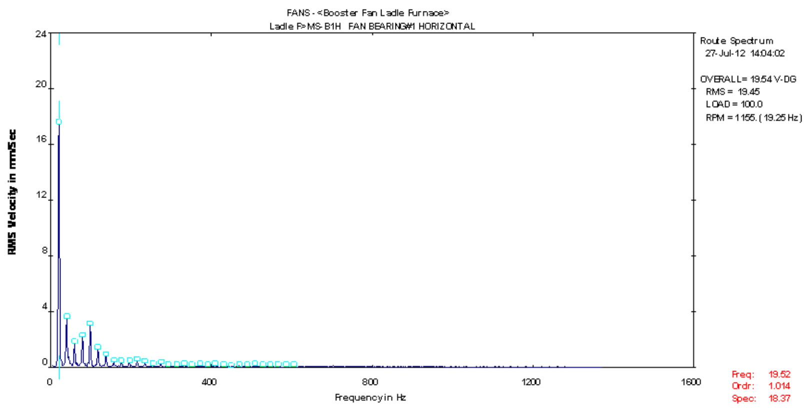
مستوى الإهتزازات "vibration level" عند سرعة الدوران (X١)	التشخيص "diagnosis"	أولوية الإصلاح "repair priority"
ملليمتر/ثانية – مربع الجذر التربيعى (mm/s rms)		
أقل من ٢,٥	عدم إتزان خفيف "slight"	لا يوجد توصيات "no recomm."
من ٢,٥ إلى ٥,٠	عدم إتزان متوسط "moderate"	مرغوب فيه "desirable"

من ٥,٠ إلى ١٥,٨	عدم إتزان خطير "serious"	مهم "important"
أكبر من ١٥,٨	عدم إتزان مفرط "extreme"	إجبارى "mandatory"

حجم الماكينة يؤثر فى حدود الإهتزازات التى ستستخدم وكقاعدة عامة للماكينات الصغيرة تقل هذه الحدود بقيمة (X ٠,٦٣) والماكينات الكبيرة ذو السرعات المخفضة تزداد هذه الحدود بقيمة (١,٦ X) والماكينات الترددية تزداد هذه الحدود بمقدار (X ٢,٥).

١–٥– تشخيص وتحليل عدم الإتزان "Diagnosing Unbalance"

عدم الإتزان واحد من أكثر المشاكل شيوعاً وعادةً ما يكون أبسط مشكلة فى تشخيصها. عدم الإتزان هو قوة راديال "radial force" وينتج عنه إهتزازات بتردد مساوى لسرعة الماكينة (X١). وهذه القوة فى الإتجاه الراديال ينتج عنها أحياناً إهتزازات فى الإتجاه المحورى " axial direction"، وخصوصاً عند إستخدام العضو الدوار المتدلى "overhung" (أى مثبت خارج البيليتين) وفى هذا العضو الدوار "rotors"، الإهتزازات المحورية أكبر من إهتزازات الراديال "radial". قوة راديال "radial force" تؤدى إلى إنحراف العمود "deflect"، مما ينتج عنه إهتزازات فى الإتجاه المحورى فى رولمان البللى.



عادةً عدم الإتزان يحدث عند سرعة دوران العمود (X١) ومقدار عدم الإتزان عبارة عن ٨٠ % أو أكثر من إجمالى قيمة الإهتزازات. وإذا كانت قيمة (X١) أقل من ٨٠ % من قيمة الإهتزازات الكلية، توقع وجود مشاكل أخرى بالإضافة إلى عدم الإتزان.

أو بقولٍ آخر يجب ألا تزيد الإهتزازات عند الترددات الآخرى عن ٢٠ % من إجمالى المستوى العام للإهتزازات "overall vibration".

وفى هذه الحالة قد يكون من الضرورى حل المشاكل الآخرى الموجودة قبل عمل الإتزان بشكل صحيح. إذا كان فى بصمة الإهتزازات أكثر من ثلاثة توافقات لسرعة الدوران، عادةً ما يكون هناك مشاكل أخرى، ويكون التفكك الميكانيكى أكثر إحتمالاً.

كن حذراً لأن هناك إستثناءات مثل التفكك الميكانيكى فى رولمان البللى والرنين فى الإتجاه الرأسى "vertical resonance".

وعموماً يجب تصحيح جميع المشاكل الآخرى قبل محاولة عمل الإتزان.

عدم الإتزان يؤثر بقوة متساوية فى جميع إتجاهات الراديال "all radial directions"، ولكن الإهتزازات نتيجة عدم الإتزان غالباً لا تكون متساوية فى جميع الإتجاهات. الإهتزازات فى الإتجاه الأفقى عادةً ما يكون أعلى فى مقدار السعة لأن أغلب الماكينات تكون أقل صلابة أو جسائة " less stiff" فى هذا الإتجاه.

١-٥-١- تحليل الاهتزاز للماكينات العمودية "Vertical" والماكينات المتدلية "overhung"

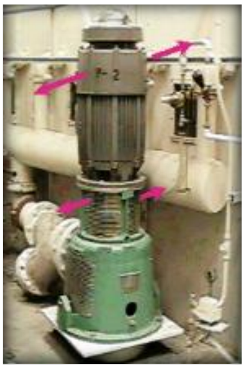
رأينا أن الشكل الموجى يكون جيبياً، والذى يجب أن يكون به قمة عالية عند X١ فى بصمة الإهتزازات. وتكون فى الإتجاه الراديال "radial" للماكينات الأفقية (هذا يعنى الإتجاه الرأسى والأفقى).

قياس مستوى الإهتزازات عند X١ يعتمد على صلادة "stiffness" تثبيت الماكينة وكمية عدم الإتزان، حيث أن الماكينات المثبتة على سوستة "spring" يكون مقدار X١ أكبر من الماكينات المثبتة على قواعد صلبه "solidly" عند نفس الدرجة من عدم الإتزان.

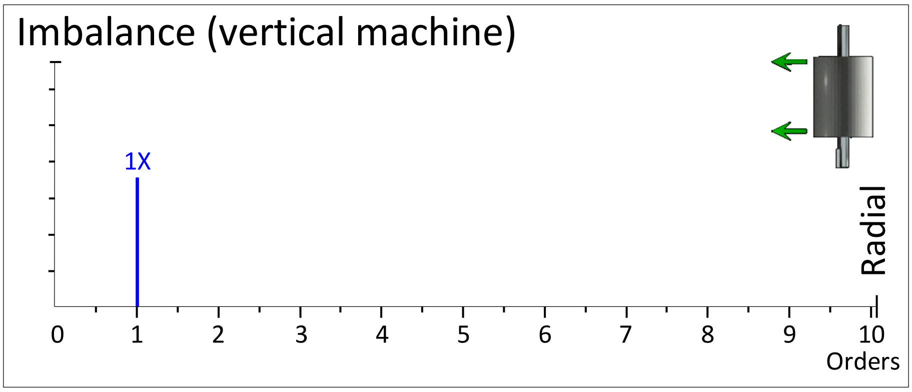
يجب مقارنة مستويات الإهتزازات عند X١ فى الإتجاه الرأسى والأفقى. ومن الممكن أن يكونا متساويين. وعلى أى حال فإن الإتجاه الذى يكون أقل صلابة "stiffness" سيكون الإتجاه الذى به أعلى مستوى للإهتزازات عند X١ .

الماكينات المثبتة رأسيا "Vertically oriented"

الماكينات المثبتة رأسيا "Vertical machines"، مثل الطلمبات، عادةً ما تظهر أكبر قمة لمستوى الإهتزازات X١ عند النهاية الحرة للموتور"free end" بغض النظر عن الجزء الذى به عدم إتزان.



كما قلنا سابقاً أن بصمة الإهتزازات سوف تظهر قمة قوية عند X١ عند القياس فى إتجاه الراديال. لعزل عدم إتزان الموتور عن عدم إتزان الطلمبة. وذلك بفصل الكوبلنج وتشغيل الموتور بمفرده "solo" أثناء قياس X١. وإذا كان مستوى X١ مازال مرتفعاً ستكون المشكلة بالموتور وإلا ستكون بالطلمبة.

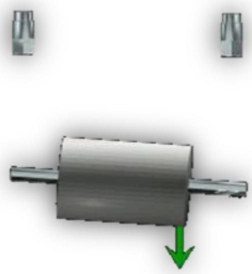


قراءات الطور تساعدنا أيضاً فى تشخيص عدم الإتزان فى الماكينات العمودية والماكينات المتدلية "overhung". الماكينات العمودية مثل الطلمبات العمودية وهى عادةً ما تكون متدلية "cantilevered" من الأرضية "foundation" ودائماً ما يظهر بها مستويات عالية من الإهتزازات (عند سرعة الدوران) عند الطرف الحر للموتور "free end" بغض النظر عن الجزء المتسبب فى عدم الإتزان. قراءات الطور التى جمعت من على الماكينة يجب أن تكون فى نفس الإتجاه "in-phase" بسبب الحركة الدائرية "circular motion" الناتجة من عدم الإتزان، وقراءة الطور المأخوذة حوالى ٩٠ درجة من القياسات المرجعية "measurements reference" ويجب أن تكون أعلى أو أقل من ٩٠ درجة تبعاً لإتجاه الدوران.

الروتور المتدلى "overhung rotor"

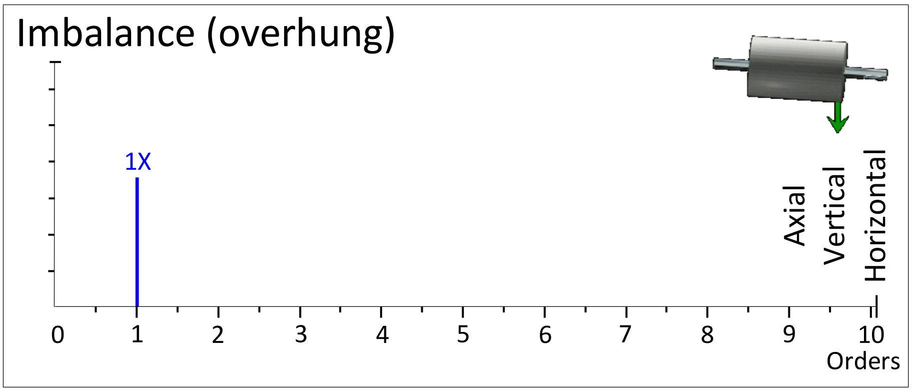
الروتور المتدلى "overhung rotor" (العضو الدوار مثبت خارج البليتين) وهذا النوع شائع جداً فى المصانع كما فى الطلمبات والمراوح.

يجب فحص الماكينة الدوارة عن قرب للتأكد من ما إذا كانت فى وضع متدلى "overhung" أو فى وضع الروتور المعلق من الوسط "centerhung rotor" (العضو الدوار مثبت بين بليتين).



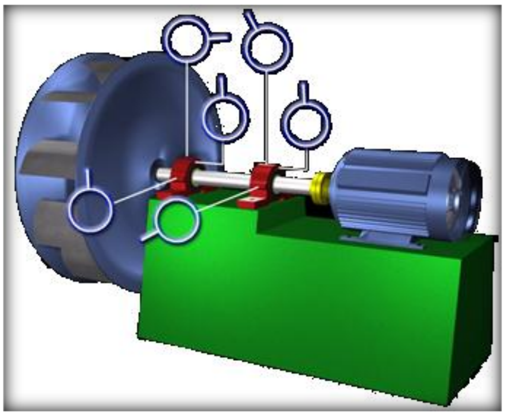
وفى كلتا الحالتين، يجب رؤية مستوى عالى للإهتزازات عند X١ ، ولكن فى هذه المرة فى الإتجاه المحورى وكذلك فى الإتجاه الرأسى والأفقى.

القياسات يجب أخذها من على رولمان البللى وقريباً من الحدافة المتدلية "overhung impeller" أو ريش المروحة.



ونلاحظ وجود (X١) عالية فى الإتجاه المحورى "axial" بسبب أن عدم الإتزان يسبب إنحناء لحظى للعمود، مما يسبب حركة لبيت البلية "bearing housing" فى الإتجاه المحورى.

ديناميكا الماكينات المتدلية مختلفة تماماً ولهذا دراستنا عن المستويات النسبية للإهتزازات " relative vibration levels" وقراءات الطور مختلفة تماماً. الطلمبات المتدلية والمراوح شائعة فى الصناعة وبالتالى يجب فحص الماكينة عن قرب لمعرفة إن كانت الماكينة متدلية أو مثبتة على الجانبين برولمان البللى "centerhung".

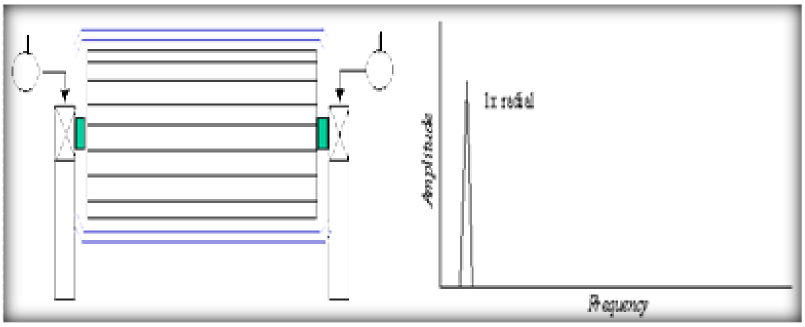


قراءات الطور تكون فى نفس الإتجاه "in-phase" فى الإتجاه المحورى، كما هو مبين بالشكل السابق. وبسبب الحركة المنحنية "bending motion" سيكون هناك فرق مابين ٠ إلى ١٨٠ درجة بين القراءات الأفقية الأثنين، وكذلك بين القراءات الرأسية.

فرق الطور "phase difference" بين القراءات الرأسية ستكون مماثلة لفرق الطور بين القراءات الأفقية. وبسبب الحركة الدائرية، يوجد تقريباً ٩٠ درجة بين القراءات الرأسية والأفقية.

١-٥-٢- تشخيص وتحليل الإهتزازات للأنواع الثلاثة لعدم الإتزان:-

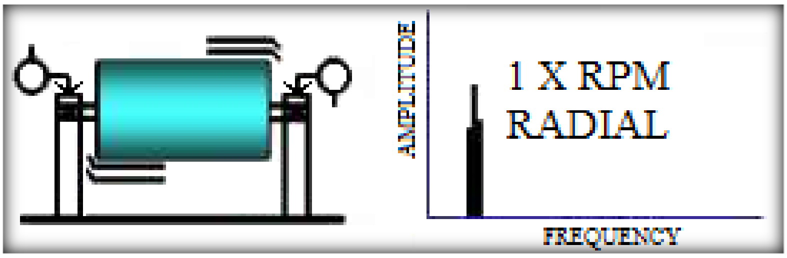
١- عدم الإتزان الإستاتيكى "Static Unbalance" ويسمى أيضاً القوة "Force Unbalance".



عدم الإتزان الإستاتيكى "Static" يكون فى نفس إتجاه زاوية الطور "in-phase". السعة الناتجة بواسطة عدم الإتزان "unbalance" تزداد بمربع السرعة "square of speed" (3x تصبح 9x) أى زيادة سعة الإهتزازات.

(X١) دائماً موجودة وعادةً ما تكون مهيمنة على البصمة "dominates". ويمكن تصحيح عدم الإتزان بوضع وزن تصحيحى فى مستوى واحد "one plane" عند مركز الجاذبية للعمود الدوار "center of gravity (CG)".

٢- عدم الإتزان الزوجى "Couple Unbalance"



الروتور المعلق من الوسط "centerhung rotor" (العضو الدوار مثبت بين بليتين) فى كثير من الأحيان يكون به عدم إتزان زوجى ويتم تصحيح عدم الإتزان بوضع وزن تصحيحى على الأقل فى مستويين عند ١٨٠ درجة.

١- فرق الطور ١٨٠ درجة تقريباً يجب أن تكون موجودة بين الخارجى "Outboard" والداخلى "Inboard" فى الإتجاه الأفقى إضافةً إلى الخارجى "Outboard" والداخلى "Inboard" للإتجاه الرأسى "verticals" على نفس العمود "shaft".

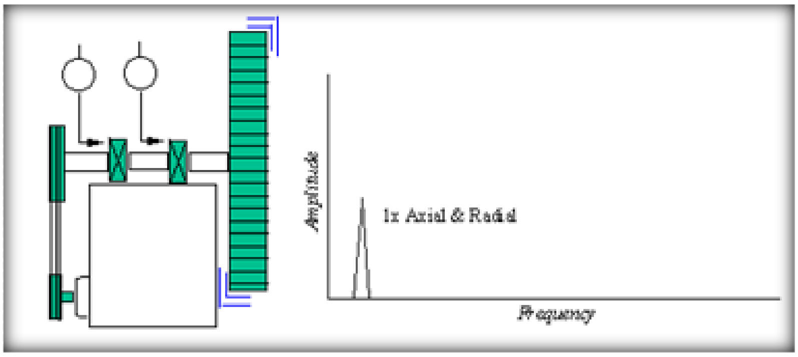
٢- (X١) دائماً موجودة وعادةً ما تكون مهيمنة على البصمة "dominates".

٣- السعة الناتجة بواسطة عدم الإتزان "unbalance" تزداد بمربع السرعة "square of speed" (3x تصبح 9x) أى زيادة سعة الإهتزازات.

٤- من المكن أن تسبب إرتفاع الإتجاه المحورى "axial vibrations" بالإضافة إلى سعة إتجاه الراديال "radial amplitudes".

٣- عدم الإتزان الديناميكى "dynamic unbalance" وهو مزيج "combination" من " force and couple"

الروتور المتدلى "overhung rotor" (العضو الدوار مثبت خارج البليتين) فى كثير من الأحيان يكون به عدم إتزان ديناميكى والذى يشمل على نوعين من الإتزان "Static or force" و"couple" وكل واحد منهم يحتاج إلى تصحيح "correction".



١- (X١) موجودة فى الإتجاهين الراديال "radial" والمحورى "axial".

٢- قراءات زاوية الطور للإتجاه المحورى تكون فى نفس الإتجاه "in-phase" ولكن قراءات إتجاه الراديال "radial" تكون غير مستقرة "unsteady".

١-٥-٣- تحليل وتشخيص عدم الإتزان بإستخدام زاوية الطور "Phase"

الطور هو أداة مهمة جداً عند تشخيص عدم الإتزان لأن (X١) يمكن ظهورها مع العديد من المشاكل الآخرى.

درجات زاوية الطور الآتية ممكن أن تتغير بمقدار ١٥ درجة.

١- فرق زاوية الطور "phase difference" فى حالة عدم الإتزان الإستاتيكى "Static"، هو (٠) درجة عند مقارنة نفس وضع الراديال "radial positions" على إثنين من رولمان البللى.

٢- فرق زاوية الطور فى حالة عدم الإتزان الزوجى "couple"، هو ١٨٠ درجة عند مقارنة نفس وضع الراديال على إثنين من رولمان البللى.

٣- فرق زاوية الطور فى حالة عدم الإتزان الديناميكى وهو مزيج "combination" من " force and couple"، هو من ٠ إلى ١٨٠ درجة عند مقارنة نفس وضع الراديال على إثنين من رولمان البللى.

٤- تغيير زاوية الطور "phase shift" من الإتجاه الأفقى إلى الرأسى يجب أن يكون ٩٠ درجة تقريباً لكل أنواع عدم الإتزان "all types of rotor unbalance" عند القياس على نفس رولمان البللى.

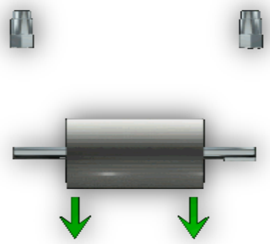
٥- الطور يجب أن يكون ثابت وقابل للتكرار "steady and repeatable" عند عمل الإتزان.
(وقد يصبح غير مستقر أثناء خطوات تنفيذ الإتزان "trim balance" ربما بسبب ظهور مشاكل أخرى تميل إلى أن تصبح أكثر هيمنة "more dominant ").

٦- هناك مؤشر جيد لعدم الإتزان "good indication" وهو يجب أن يكون فرق الطور "phase difference" بين الإتجاه الأفقى الداخلى "inboard horizontal" (IBH) والإتجاه الأفقى الخارجى "outboard horizontal" (OBH) مساوياً لفرق الطور بين الداخلى الرأسى "inboard vertical" (IBV) والخارجى الرأسى "outboard vertical" (OBV).

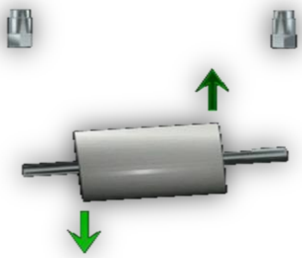
<u>١-٥-٤ ملخص على تحليل البيانات "Analyzing the data"</u>

تعلمنا أن نتوقع قمة عالية عند (X١) فى المحاور الرأسية والأفقية والمحورية للماكينات المتدلية "overhung" أو "cantilever". وتوقعنا أيضاً أن الشكل الموجى "time waveform" يكون جيبياً جداً "sinusoidal".

[illegible] (X١) وإلقاء نظرة على كل من بيانات الإتجاه الرأسى والأفقى (والإتجاه المحورى للماكينات المتدلية "overhung").
والتحدى الحقيقى هو التأكد من عدم الخطأ فى تشخيص مشكلة عدم الإتزان.
ويجب عدم تنفيذ عملية الإتزان على ماكينة بها مشاكل أخرى مثل عدم السنترة والتفكك الميكانيكى ..إلخ. حيث يجب حل هذه المشاكل أولاً قبل أداء عملية الإتزان.
وكما درسنا الحالات المختلفة لمشاكل الإهتزازات، سوف تلاحظ أنه يوجد عدد من هذه الحالات تعطى قمة إهتزازات عالية عند X١، تشمل عدم السنترة والتفكك وإنحناء الأعمدة وعدم مركزية الروتور. ويجب أن تكون راضى عن نفسك فى أنك لم تخطئ فى تشخيص عدم الإتزان مع وجود إحدى هذه المشاكل.
يمكنك أيضاً إستخدام زاوية الطور"phase" للمساعدة فى عملية التمييز. ومن المعروف أننا لا نقيس زاوية الطور كجزء من الإختبارات الروتينية، ولكننا يمكن إستخدامها كإحدى القياسات الخاصة.
يجب أن تشاهد فرق زاوية الطور بين قراءات الإتجاه الرأسى والأفقى والمأخوذة من نفس رولمان البللى للماكينة.
ومع عدم الإتزان الإستاتيكى تكون زاوية الطور عند طرفى الماكينة "ends of the machine" فى نفس الإتجاه "in phase".



ومع عدم الإتزان الزوجى تكون زاوية الطور عند طرفى الماكينة "ends of the machine" ١٨٠ درجة خارج الطور "out of phase".

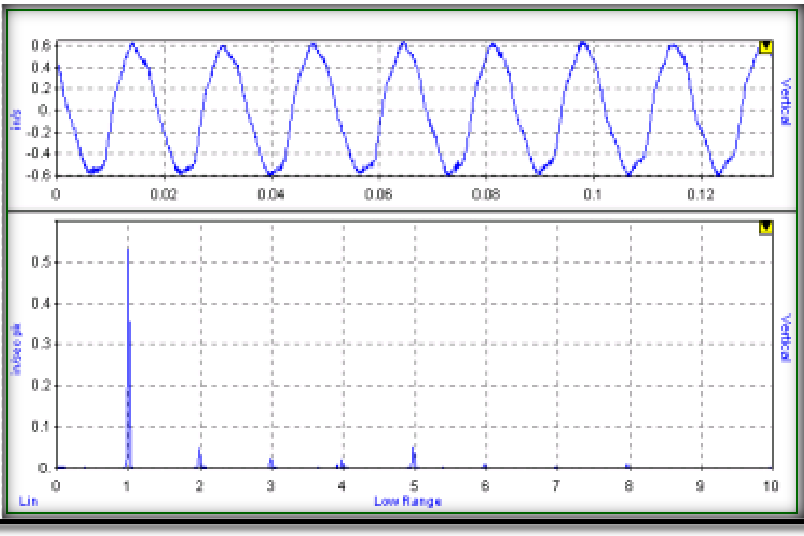


في كثير من الحالات سيكون لديك عدم إتزان ديناميكى (مزيج من الاثنين معاً) ولا يوجد قواعد عامة لتغير زاوية الطور بين دخول "inboard" وخروج "outboard" رولمان البللى.

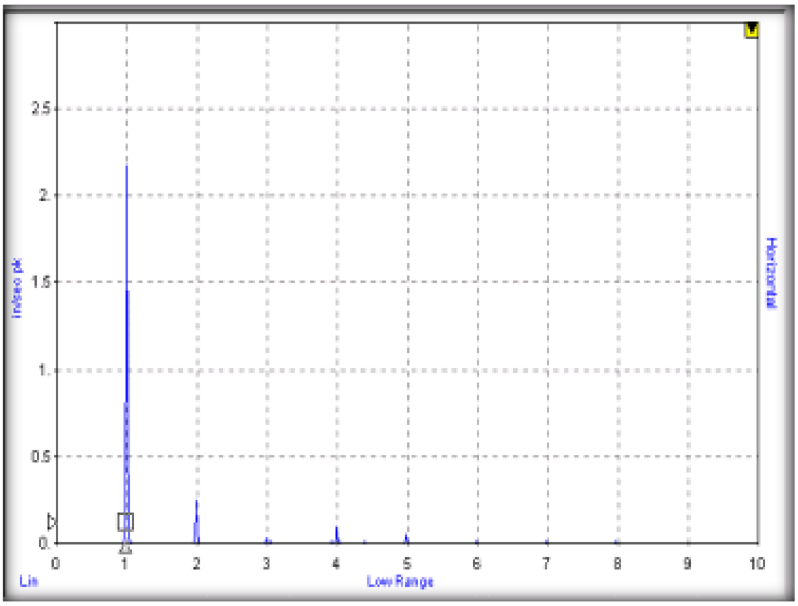
المثال الأول:-



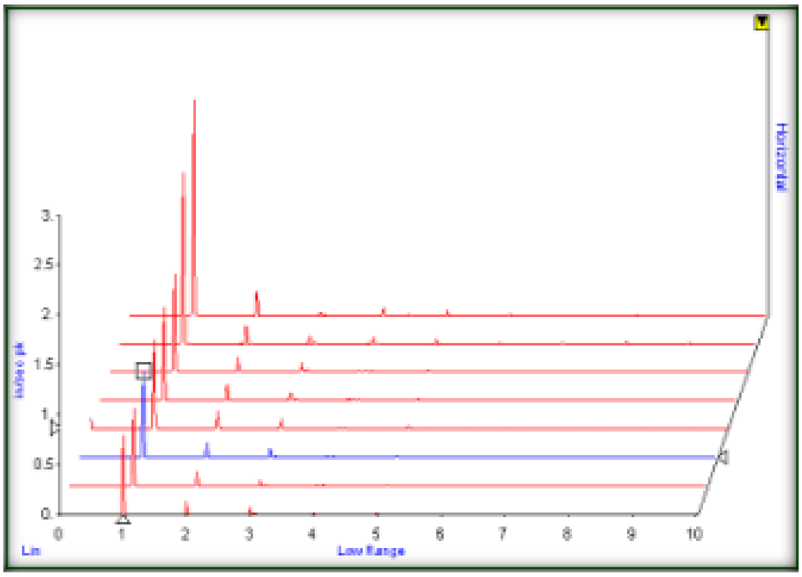
فى الإتجاه الرأسى نرى فى بصمة الإهتزازات قمة عالية عند X١ (٩,٥ rms mm/sec)، والشكل الموجى على هيئة موجة جيبية جداً.



أما فى الإتجاه الأفقى سترى مستويات عالية للغاية (٣٩ rms mm/sec) عند X١. وهذا يشير إلى أن هناك (رنين / مرونة) شديدة بالأرضية يتم إثارتها بواسطة عدم الإتزان. وكما توقعنا مستوى الإتجاه المحورى أقل من (١,٦ rms mm/sec).

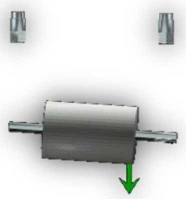


إذا قمت من خلال البرنامج بإختيار عدد كبير من القياسات سترى شلالات من البيانات "Waterfall". يمكنك أن ترى أن مستوى الاهتزاز عند التردد X١ تتزايد على مدى فترة من الزمن. هذا يمكن أن يكون بسبب تراكم الأوساخ (الرواسب) أو التآكل غير المنتظم لريشة الطلمبة.

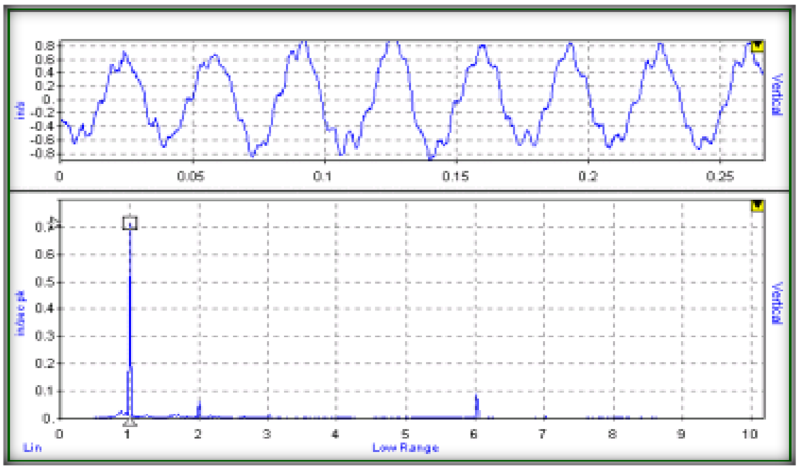


المثال الثاني:-

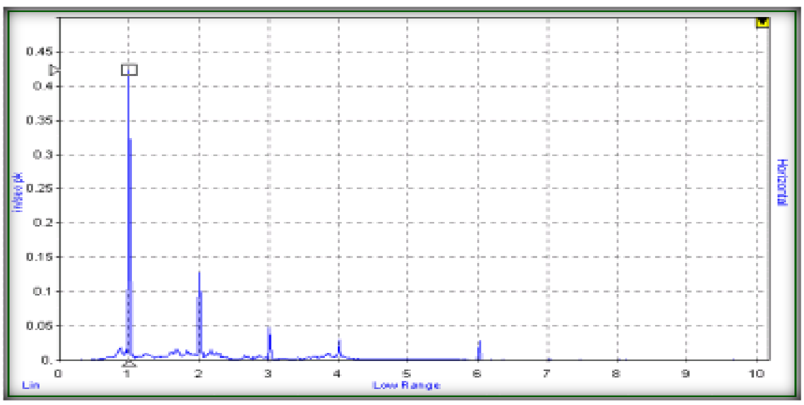
ماذا تتذكر عن الروتور المتدلى "overhung rotors"؟ عندما تكون الماكينة بها عدم إتزان فإننا نتوقع مستوى إهتزازات عالى عند X١ فى الإتجاه الرأسى والأفقى وأيضاً فى الإتجاه المحورى.



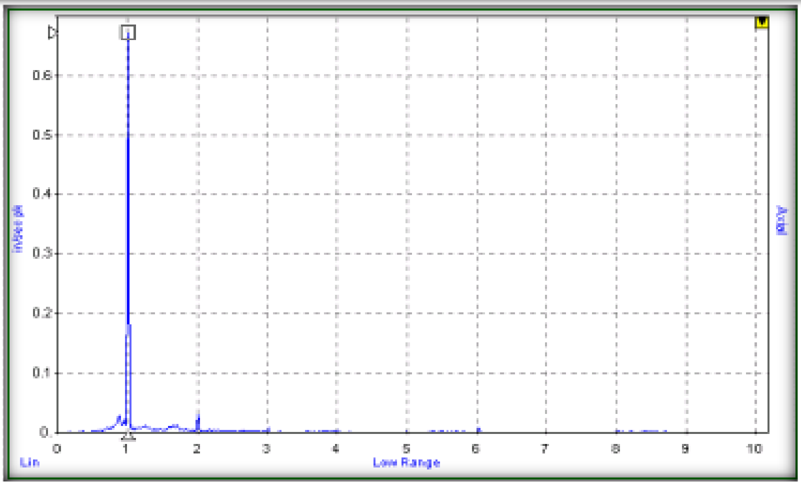
يمكننا أن نرى إرتفاع X١ فى الإتجاه الرأسى. والشكل الموجى يبدو جيبياً جداً "sinusoidal". والتمايل الموجود بها نتيجة وجود X٢ و X٦ (عدد ريش الطلمبة).



وبالنظر إلى بيانات المحور الأفقى نجد أن المستوى عند X١ هو أيضاً مهيمن "dominant" وعالى جداً.



وأخيراً بالنظر إلى الإتجاه المحورى نرى مرة أخرى أن المستوى عند X١ أيضاً مهيمن "dominant" وعالى جداً.



وفى هذه الحالة كان لدينا مثال كلاسيكى (تقليدى) عن عدم إتزان ماكينة لها روتور متدلى "overhung rotor". وإذا نظرنا إلى مستوى الإهتزازات على الموتور سوف تجد أن المستويات أقل بكثير وهو شئ متوقع.

١-٦- عمل الإتزان للعضو الدوار الصلب فى الموقع "field balancing"

الإتزان هو عملية تصميم أو تعديل الماكينات لتخفيض عدم الإتزان إلى مستوى مقبول والقضاء عليه نهائياً إذا أمكن ذلك.

والروتور الذى يعمل عند سرعة دوران أقل من ٧٠% من السرعة الحرجة "critical speed" يعتبر روتور صلب (جاسئ) "Rigid Rotor". مع العلم بأن أكثر من ٩٠% من الأعضاء الدوارة تكون صلبة "Rigid". والسرعة الحرجة هى السرعة التى يحدث عندها الرنيين "resonance" نتيجة إثارة التردد الطبيعى "natural frequency".

١-٦-١- الإحتياطات اللازمة لعمل الإتزان:-

الشكل الزمنى للموجة "time waveform" يجب أن يحتوى على موجة إهتزاز جيبية " sine wave". وإذا أخذت القياسات بإستخدام العجلة "Acceleration" تشوه الموجة الجيبية نظراً لتضخيم الترددات العالية.

ثبات "Steady" الطور "phase" وثبات السعة "amplitude" مطلوب تحقيقها أيضاً فى عملية الإتزان. إذا كانت أحدهما غير مستقرة لا تشخص المشكلة كعدم إتزان. فى بعض الأحيان يكون من الحكمة قياس إهتزازات الماكينة ومن ثم إيقافها بعد ذلك "shut down". قم بتشغيل الماكينة مرة أخرى وتحقق ما إذا كانت قياسات الإهتزازات والطور تكررت كما هى أم لا "duplicated".

١- إجراء تحليل الاهتزاز على الماكينة وأن تكون الإهتزازت وزاوية الطور مستقرة "steady".

٢- أخذ قراءات الإهتزازات فى الإتجاه الراديال "radial" والمحوري "axial".

٣- تأكد من نظافة العضو الدوار.

٤- تحقق من عدم وجود أجزاء مفكوكة على العضو الدوار.

٥- تأكد من حل جميع المشاكل الآخرى للماكينة قبل عملية الإتزان.

٦- تأكد من عدم وجود رفة "run out" وتحقق من ذلك بإستخدام المؤشر "dial indicator".

٧- إزالة جميع الأوزان التصحيحية السابقة "correction weights".

١-٦-٢- قواعد الإتزان "Balancing Rules"

يتم عمل إتزان فى مستويين لجميع الأعضاء الدوارة "rotors" بغض النظر لنسبة "القطر/الطول" (D/W).

على أية حال، فى العضو الدوار المتدلى "overhung"، إذا كانت الإهتزازات فى رولمان البللى القريب من الكتلة المتدلية "overhung mass" لها سعة تقريباً أربعة أضعاف الإهتزازات على البلية الآخرى، من الممكن عمل الإتزان فى مستوى واحد "single-plane balancing".

العضو الدوار المتدلى الذى فيه تكون نسبة "القطر/الطول" (D/W) ١:٤ أو أكثر يمكننا عمل الإتزان داخل الحدود المسموحة "tolerance" فى مستوى واحد "single-plane balance".

وبالإضافة إلى ذلك، الروتور المتدلى الضيق "narrow overhung rotors" لايستجيب أحياناً بشكل جيد إلى عمل الإتزان فى مستويان "two-plane". على الروتور المتدلى الضيق، يصبح من الصعب فصل تأثير الوزنين "two weight" على مستويان القياس " two measurement planes" لأنها ببساطة قريبة من بعضها البعض.

١-٦-٣- إختيار الوزن التجريبى المناسب "Trial Weight"

إختيار الوزن التجريبى المناسب مهم لأن الوزن الخفيف جداً "too light" قد لا توفر إستجابة مناسبة لحساب الوزن التصحيحى "correction weights" ومكانه "location". الوزن التجريبى الكبير جداً "too large" من الممكن أن يدمر الماكينة "wreck".

الوزن التجريبى يجب أن يلتزم "adhere" بالقاعدة ٣٠/٣٠ (30/30 rule) ومعناها تغيير زاوية الطور بنسبة ٣٠% أو تغيير سعة الإهتزازات على الأقل ٣٠%.

١-٦-٤- خطوات تنفيذ عملية الإتزان فى مستوى واحد "Single-Plane Procedure"

١- وضع أجهزة الإهتزازات وملحقاتها المستخدمة فى عملية الإتزان على النحو المبين من قبل الشركة المصنعة لأجهزة الإتزان.

٢- عمل تشغيلة مرجعية للماكينة "reference run" أو (تشغيلة المعايرة) "calibration run" لقياس الإهتزازات وزاوية الطور.

٣- إضافة وزن تجريبى "trial weight".

٤- عمل تشغيل تجريبى "trial run".

٥- ترك أو إزالة الوزن التجريبى تبعاً لقيمة الإهتزازات (يترك أو يزال تبعاً لتأثيرها الإيجابى أو السلبى).

٦- إضافة الوزن التصحيحى "correction weight".

٧- تشغيل الماكينة "trim run" لمعرفة مدى التحسن.

٨- إضافة وزن تصحيحى مرة إخرى "trim weight" إذا لزم الأمر.

٩- لاتعمل أكثر من عدد ٢ "trim run".

١٠- إذا كان هناك حاجة لعمل أكثر من ذلك لخفض قيمة الإهتزازات لتصل إلى الحدود المسموحة، فيجب ترك جميع الأوزان فى مكانها "weights in place" ومسح بيانات الإتزان الحالية "erase the data collected" والبدء فى عملية الإتزان من جديد.

١-٦-٥- خطوات تنفيذ عملية الإتزان فى مستويين "Two-Plane Procedure"

١- وضع أجهزة الإهتزازات وملحقاتها المستخدمة فى عملية الإتزان على النحو المبين من قبل الشركة المصنعة لأجهزة الإتزان.

٢- عمل تشغيلة مرجعية للماكينة "reference run" أو (تشغيلة المعايرة) "calibration run" لقياس الإهتزازات وزاوية الطور.

٣- إضافة وزن تجريبى "trial weight" للمستوى رقم #١ "plane #1".

٤- عمل تشغيل تجريبى للمرة الأولى "trial run #1".

٥- إزالة الوزن التجريبى من المستوى الأول "plane #1" ووضعه فى المستوى الثانى " plane #2".

٦- عمل تشغيل تجريبى للمرة الثانية "trial run #2".

٧- إزالة الوزن التجريبى من المستوى الثانى "plane #2".

٨- إضافة أوزان تصحيحى "correction weights" للمستوى الأول والثانى.

٩- عمل تشغيل تجريبى "trial run" وإضافة وزن تصحيحى "trim weight" إذا لزم الأمر.

١٠- لا تعمل أكثر من عدد ٢ "trim run".

١١- إذا كان هناك حاجة لعمل أكثر من "trim run" لخفض قيمة الإهتزازات لتصل إلى الحدود المسموحة، فيجب ترك جميع الأوزان فى مكانها "weights in place" ومسح بيانات الإتزان الحالية "erase the data collected" والبدء فى عملية الإتزان من جديد.

هناك مقولة من الممكن أن تسبب لك بعض المتاعب وهى (أن أى مروحة تهتز يجب عمل لها الإتزان) فليس كل إرتفاع فى مستوى الإهتزاوات يكون سببه هو عدم الإتزان ومن الممكن القول أن هناك فوبيا الإتزان وهنا بعض النصائح التى سوف تساعدك على تحديد المشكلة:-

١- الشكل الزمنى للموجة "time waveform" يجب أن يحتوى على موجة إهتزاز جيبية غير مشوهه "sine wave".

٢- سعة "amplitude" إهتزازات سرعة عمود الدوران (X١) يجب أن تكون ثابتة "Steady" وقابلة للتكرار "repeatable".

٣- الطور يجب أن يكون ثابت وقابل للتكرار "steady and repeatable".

٤- لا تزيد توافقات سرعة الدوران فى بصمة الإهتزازات عن ثلاثة (يمكن إستثناء رولمان البللى).

٥- لا يكون فى أرضية بصمة الإهتزازات ضوضاء مرتفعة "noise floor".

٦- لا يكون فى بصمة الإهتزازات توافقات ثانوية "sub-harmonics".

٧- يجب أن يكون الروتور نظيف وخالى من التراكمات "free of buildup".

٨- عمل الإتزان يكون آخر إجراء تصحيحى للماكينة حيث من الضرورى حل جميع المشاكل (حل المشاكل الواضحة أولاً).

الروتور لايصبح غير متزن بدون أسباب. إذا كان إتزان الروتور مقبولاً ثم أصبح غير متزن. حاول دائماً كشف ومعرفة السبب الجذرى لعدم الإتزان "root cause". فى بعض الأحيان يكون الروتور فى حاجة لدعم وتقوية لحمايته من الشقوق "cracks"، التى من الممكن أن تجعل الروتور مشوهاً "deform" مما يؤدى إلى عدم الاتزان المفاجئ. إذا أعيد إتزان الروتور بدون إصلاح التشققات "repairing the cracks"، قد يحدث كسر مفاجئ للماكينة. ويمكن تجنب مثل هذه المشاكل عن طريق تنظيف الماكينة "cleaning" وعمل التفتيش اللازم "inspection" لإكتشاف التشققات وعمل الإصلاح.

١-٦-٦- أسباب حدوث خطأ فى عملية الإتزان "Balance Job"

هناك أسباب رئيسية لا تمكنا من الوصول إلى قيمة الإهتزازت المسموحة "standard" عند عمل الإتزان.

١. خطأ في إنشاء البيانات الأساسية للماكينة على جهاز قياس وتحليل الإهتزازات.

٢. الفشل فى إزالة الوزن التجريبى "trial weight".

٣. المشكلة ليست فى عدم الإتزان (عادةً ما تكون تفكك).

٤. إدخال موضع "weight location" للوزن التجريبى "trial weight" بشكل غير صحيح فى برنامج الإتزان.

٥. الروتور المتدلى "Overhung" يتطلب عمل الإتزان فى مستويين "two-plane".

٦. وضع الوزن "Weight placement" ليس فى الإتجاه الصحيح "proper direction" مع إتجاه الدوران "rotor direction".

٧. وجود حالة الرنين "resonant condition".

١-٦-٧- المشاكل التى تؤدى إلي عدم إستمرار الروتور فى إتزانه:-

- حساسيته للتأثير الحراري "Thermal sensitivity".
- تشغيله بالقرب من الرنين "resonance".
- حدوث تعرية أو تآكل "erosion" للروتور.
- تراكم الشوائب "Material buildup".
- تغير السرعة مما يجعل الماكينة تصل إلي حالة الرنين "resonance condition".
- تفكك أجزاء الروتور "Loose rotor part".

٢- عدم السنترة أو المحاذاه "Misalignment"

مقدمه:-

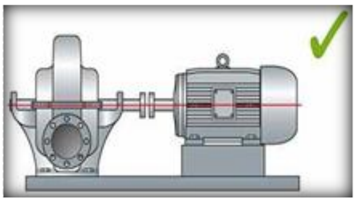
يتفق معظم الخبراء على أن أكثر من ٥٠% من جميع مشاكل الماكينات "machinery problems" وعن ما يصل ٥٠٪ من جميع التكاليف المتعلقة بأعطال الماكينات الدوارة سببها عدم الضبط الدقيق للمحاور.

وبعمل الضبط الدقيق لمحاور المعدات يمكننا من زيادة جهوزية الماكينات "uptime" وتقليل الأعطال بنسبة تصل إلي ٥٠٪ وتقليل الوقت الغير المخطط للتوقف عن العمل " reduce unplanned downtime" والذى يؤدى إلي خسارة فى الإنتاج.

في هذه الأيام يوجد تحدياً لخفض التكاليف "reducing costs" وتحسين الأصول "optimizing assets" والحاجة إلي عمل ضبط دقيق للمحاور الآن هو أكبر من أى وقت مضى.

وعدم المحاذاه "Misalignment" تنتج من أن الأعمدة "shafts" والكوبلنج "couplings" ورولمان البللى "bearings" لا يتم محاذاتهم بشكل صحيح على طول خطوط مراكزهم "centerlines".

وبالتالى تحتاج الماكينة إلي محاذاه فى المستويين الأفقى والرأسى.



ويجب عدم الخلط "Confusing" بين عدم السنترة وعدم الإتزان. وهناك طريقة واحدة للتمييز بين عدم السنترة وعدم الإتزان هو زيادة سرعة الماكينة. ومستوى الإهتزازات نتيجة عدم الإتزان سوف يزداد بزيادة تتناسب مع مربع السرعة، بينما الإهتزازات نتيجة عدم السنترة لن تتغير. بالطبع هذا الإختبار لا يمكن تطبيقه على كل الماكينات. وهناك إختبار آخر يمكن القيام به وهو

تشغيل الموتور بمفرده بدون الكوبلنج "uncoupled". إذا كان لا يزال هناك قمة مرتفعة عند (X١)، سيكون الموتور به عدم إتزان. وإذا إختفت (X١)، فتكون مشكلة عدم الإتزان فى الماكينة المقادة "driven"، أو تكون المشكلة عدم السنترة. وقليلاً من الإختبارات يمكن يوفر أدلة جديدة.

٢-١- أسباب عدم السنترة "Causes of misalignment"

وبطبيعة الحال، فإن السبب الرئيسى لجعل الماكينات خارج المحاذاه "out of alignment" هو أنها لم يتم عمل المحاذاه لها بالشكل الصحيح فى أول مرة عند تركيبها. وهذا يمكن أن يكون بسبب سوء التدريب أو عدم وجود المعدات المناسبة (أو الوقت) وبالتالى من الطبيعى أن تبقى الماكينة خارج المحاذاه وتلحق الضرر بكل من مانع التسرب ورولمان البللى.

١- التمدد الحراري "Thermal expansion" نتيجة لعمليات التشغيل (كما هو الحال مع التوربينات). معظم الماكينات تضبط محاورها فى حرارة الجو العادية (باردة)، ولكونها تعمل وترتفع درجة حراراتها فإن هذا النمو الحرارى "thermal growth" يسبب نمواً أيضاً فى عدم السنترة.

٢- الماكينات المتصلة بكوبلنج مباشرة "directly coupled" لا يتم سنترتها بالشكل الصحيح.

٣- عدم دقة تجميع أجزاء الماكينة مثل المواتير والطلمبات ...إلخ.

٤- تغير نسبى فى أماكن أجزاء المعدات بعد التجميع.

٥- التشويه الناتج من القوى المنقولة إلى الماكينة عن طريق الأنابيب أو المواسير...إلخ.

٦- تشويه الدعامات المرنة "flexible supports" بسبب عزم الدوران "torque".

٧- درجة الحرارة تسبب تمدد هيكل الماكينة "machine structure".

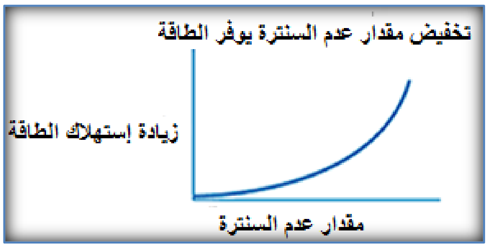
٨- شفة الكوبلنج "Coupling face" ليست عمودية على محور العمود.

٩- مشكلة السوفت فوت "Soft foot" وهى أن تكون إحدى أرجل الماكينة معلقة.

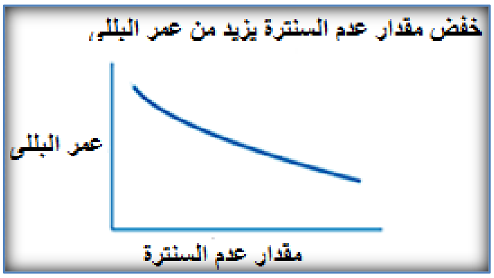
١٠- أرضية الماكينة غير مستوية "Foundation uneven" ومتحركة أو غير مستقرة " shifting or settling".

٢-٢- الآثار السلبية لعدم السنترة "Effects"

١- زيادة الاحتكاك وبالتالي إستهلاك الطاقة.



٢- إنهيارسابق لأوانه لرولمان البللى لزيادة الحمل عليه أكبر من مواصفات التصميم.



٣- إنهيارسابق لأوانه للعمود والكوبلنج.

٤- إنهيارسابق لأوانه لمانع التسريب "seal" وبالتالى زيادة تسريب زيوت التشحيم.

٥- إنهيار الكوبلنج ومسامير القاعدة.

٦- زيادة الاهتزاز والضوضاء.

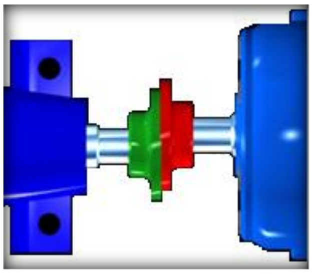
٢-٣- أنواع عدم السنترة "misalignment"

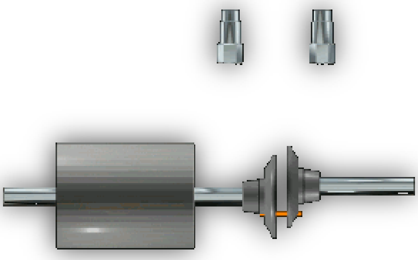
عدم السنترة هى بإختصار عدم تطابق خط مركز العمودان للكوبلنج مع بعضها البعض.

٢-٣-١- عدم السنترة المتوازى "parallel misalignment"

عدم السنترة المتوازى (الإزاحى "offset") يحدث عندما يكون خط مركز العمود " shaft centerlines" متوازياً ولكن مزاح أحدهما عن الآخر.

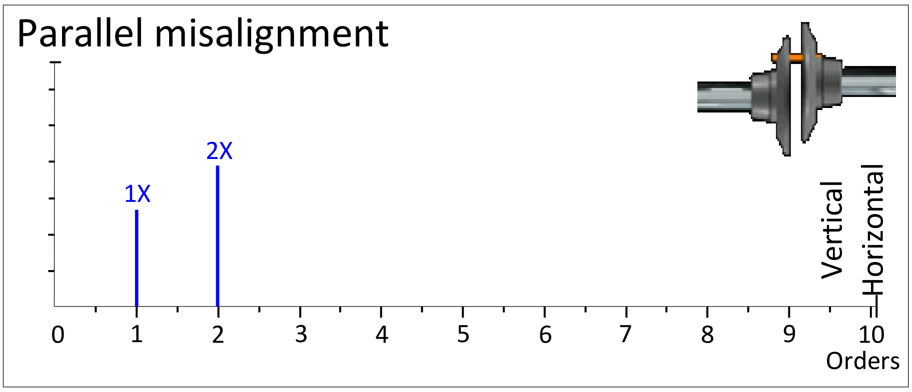
عدم السنترة المتوازى ينتج عنه قوتان الأولى قوة القص (زاوية القص تكون ٤٥ درجة) وقوة إنحناء لحظية تؤثرعلى نهاية الكوبلنج لكل عمود.



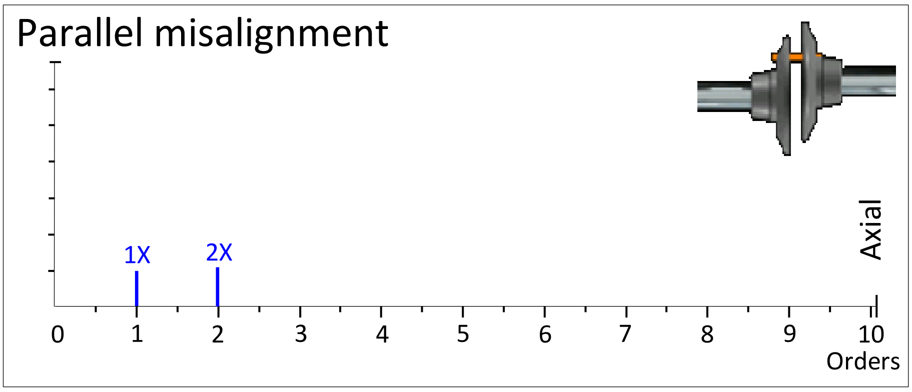


إرتفاع مستوى الإهتزازات عند X٢ و X١ فى إتجاه الراديال "radial" (رأسى وأفقى) على رولمان البللى على جانبى الكوبلنج.

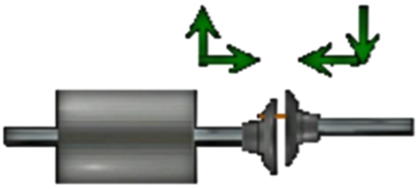
وفي أغلب الأحيان تكون X٢ أكبر من X١.



وإذا كان مستوى الإهتزازات فى الإتجاه المحورى لكل من X١ وX٢ منخفض فإن عدم السنترة المتوازى يكون نقياً.

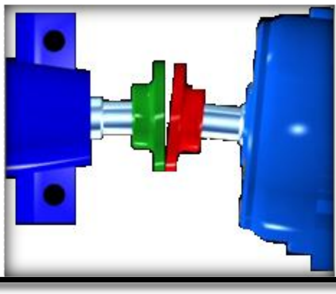


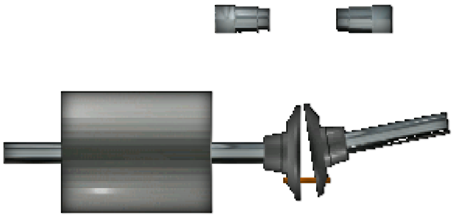
زاوية الطور"phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه "Out-of-phase" على جانبى الكوبلنج "across the coupling".

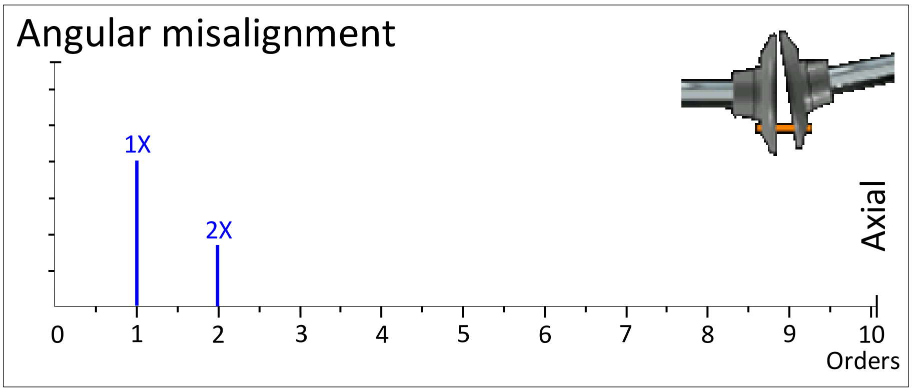


٢-٣-٢- عدم السنترة الزاوى "angular misalignment"

عدم السنترة الزاوى يحدث عندما يكون العمودان متصلان "joined" عند الكوبلنج "coupling" وليس متوازيين وتؤثر قوة الإنحناء على العمود "shaft".

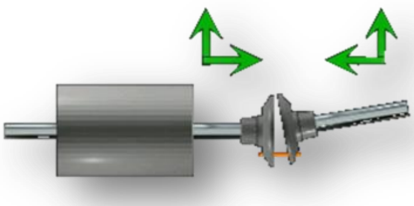






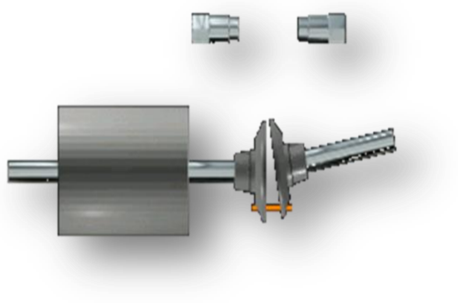
عدم السنترة الزاوى ينتج عنه قوة إنحناء لحظية تؤثرعلى كل عمود، ويتولد مستوى إهتزاز قوى عند ١X وبعض الإهتزازات عند ٢X فى الإتجاه المحورى لكل من البليتين.

سيكون هناك أيضاً إهتزازات قوية فى إتجاه الراديال "radial" (رأسى وإفقى) عند ١X و٢X وهذان الحدثان يكونان فى نفس الإتجاه "in-phase".

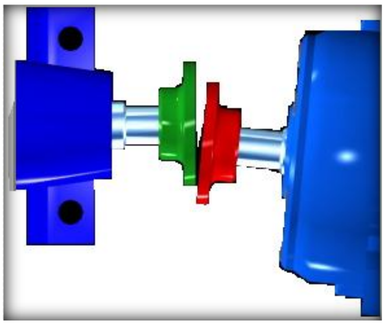


إهتزازات زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه "Out-of-phase" على جانبى الكوبلنج "across the coupling" فى الإتجاه المحورى، وفى نفس الإتجاه "in-phase" فى إتجاه الراديال.

عدم سنترة الكوبلنج عادةً ما ينتج عنها مستوى إهتزازات عالى عند ١X على رولمان البلى على الجهات الآخرى للأعمدة. وهذا يعنى أنه يمكننا جمع الإهتزازات على النقط الخارجية "outboard" لرولمان البللى للموتور أو الطلمبة على سبيل المثال ومنها أيضاً تظهر عدم السنترة.

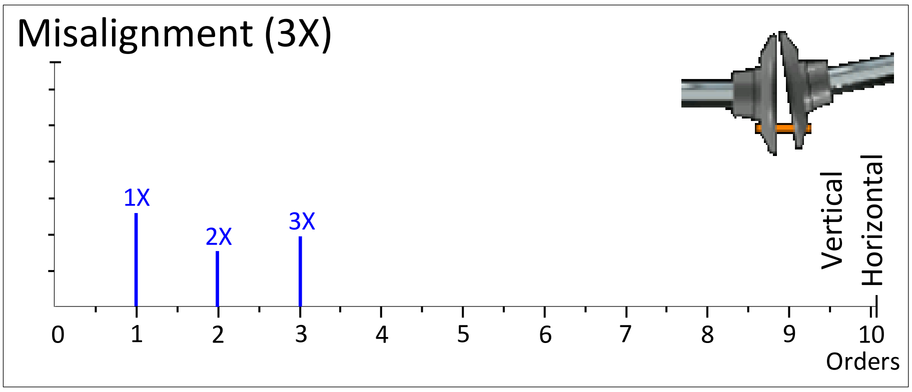


٢-٣-٣- عدم السنترة الشائع "Common Misalignment"



معظم حالات عدم السنترة مزيج من عدم السنترة المتوازى وعدم السنترة الزاوى. التشخيص، وكقاعدة عامة، يتم على أساس وجود إهتزازات مهيمنة "dominant vibration" عند ضعف سرعة الدوران (X٢) مع زيادة مستوى الإهتزازات عند (X١) فى الإتجاه المحورى "axial" وفى أى من الإتجاه الرأسى أو الإتجاه الأفقى.

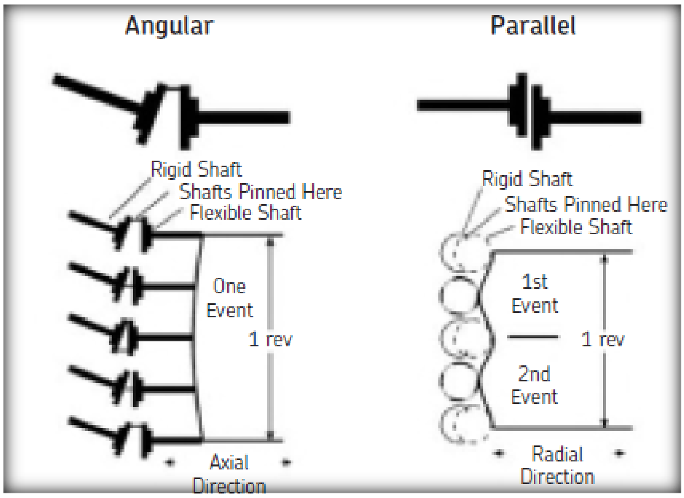
مشاكل الكبالنج المرنة "Flexible coupling" سوف تضيف توافقات لكل من (X١) و (X٢). وفى الواقع عدم السنترة ينتج عنها مجموعة متنوعة من الأعراض "symptoms" على مختلف الماكينات، ويجب تشخيص كل حالة على حده إستناداً على فهم الأسباب.



وبالإضافة إلى قمم (X١) و(X٢)، كثيراً ما يظهر قمة قوية عند (X٣) مصاحبه لعدم السنترة فى كثير من الأحيان.

٢-٤- تفسير ما يحدث لكوبلنج المعدة عند عدم السنترة المتوازى والزاوى

عدم السنترة الزاوى يسبب إهتزازات فى الإتجاه المحورى عند تردد سرعة الدوران (X١). وعدم السنترة المتوازى ينتج عنه إهتزازات فى الإتجاه الراديال عند ضعف سرعة الدوران (X٢) كما بالشكل.



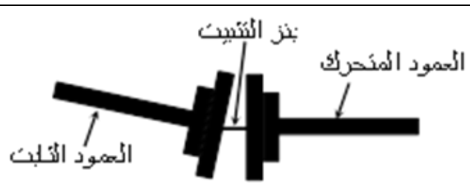
مثال:-

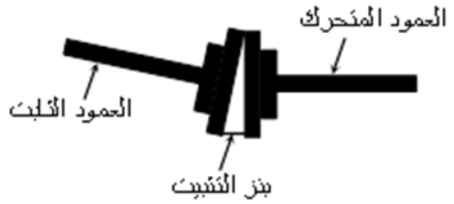
معدة مكونة من جزئين قائد ومنقاد، القائد هو الجزء المتحرك (العمود المتحرك) والمنقاد هو الجزء الثابت (العمود الثابت) ويوجد بنز لتثبيت العمودين معاً عند فلانشات الكوبلنج.

وعندما يتم تثبيت المعدة وتجميع الكوبلنج ولا يتم محازاة العمودين معاً بدقة يحدث مشكلة عدم سنترة وهو إما عدم سنترة متوازى أو زاوى أو كلاهما معاً.

٢-٤-١- فى حالة عدم السنترة الزاوى

ينتج عن عدم السنترة الزاوى إهتزاز يؤثر فى الإتجاه المحورى للمعدة وهذا التأثير يحدث مرة واحدة فى كل لفة للعمود كالتالى:-

١- فى حالة وجود بنز التثبيت فى أعلى نقطة عند الساعة ١٢ تكون الثغرة بين العمودين (الفلنشتين) تأخذ شكل حرف V مقلوب كما بالشكل المقابل أى أن الفلنشتين متقاربتين من أعلى أكثر من أسفل (وهو الوضع الخطأ الذى تم تركيب المعدة عليه).	
٢- عند دوران العمودين ربع لفه يكون البنز عند الساعة ٣ وما زالت الثغرة تأخذ الشكل حرف V ولكن مع إختلاف مقدارها	

أى أن المسافة بين الفلنشتين تقل مع المحافظة على الشكل حرف V.	
٣- عند دوران العمودين ربع لفه ثانية يكون البنز فى أسفل نقطة عند الساعة ٦ وتكون الثغرة أقل ما يمكن أى أن المسافة بين الفلنشتين تقل أكثر من الوضع السابق.	
٤- عند دوران العمودين ربع لفه ثالثة يكون البنز عند الساعة ٩ فتزداد قيمة الثغرة أى تزداد المسافة بين الفلنشتين حتى تصل لقيمتها فى الخطوة ٢.	
٥- عند دوران العمودين ربع لفه رابعة يكون البنز عند الساعة ١٢ مرة أخرى وتزداد قيمة الثغرة أى تزداد المسافة بين الفلنشتين حتى تصل لقيمتها فى الخطوة ١.	

مما سبق يتضح أن الحركة الوحيدة التى تحدث هى تقارب وتباعد الفلنشتين فى الإتجاه المحورى مرة واحدة فى اللفة الواحدة حيث أن الفلنشتين بدأتا فى التقارب بداية الدوران حتى وصلت لأقل ما يمكن عند نصف اللفة ثم بدأتا فى الإبتعاد فى النصف الآخر حتى وصلت إلى نفس نقطة البداية عند نهاية اللفة. إذاً هو حدث وحيد فى الإتجاه المحورى فى اللفة الواحدة. وهذا هو تأثير عدم السنترة الزاوى للأعمدة.

ثانياً: فى حالة عدم السنترة المتوازى (الإزاحى):- ينتج عن عدم السنترة المتوازى إهتزاز يؤثر فى الإتجاهين الأفقى والرأسى للمعدة وهذا التأثير يحدث مرتين فى كل لفة للعمود كالتالى:-

٢-٤-٢- عندما يكون عدم السنترة المتوازى فى الإتجاه الأفقى

١- فى حالة وجود بنز التثبيت فى أعلى نقطة عند الساعة ١٢ تكون الفلنشتين فى نفس مستوى الإرتفاع بينما توجد إزاحة بينهما فى الإتجاه الأفقى حيث أن العمود المتحرك له إزاحة ناحية الساعة ٣ (بسبب الوضع الخطأ الذى تم تركيب المعدة عليه).	

٢- عند دوران العمودين ربع لفه يكون البنز عند الساعة ٣ ويتحرك العمود المتحرك قصراً فى إتجاه الساعه ٩ حتى يتطابق مع العمود الثابت فى نهاية ربع اللفة تحت تأثير شد البنز للفلنشتين.	
٣- عند دوران العمودين ربع لفه ثانية يكون البنز فى أسفل نقطة عند الساعة ٦ ويعود العمود المتحرك للحركة فى إتجاه الساعه ٣ تحت تأثير إنضغاطه والقابلية لرجوعه لوضعه الأصلى الذى تم تركيبه عليه تاركاً العمود الثابت فى مكانه (وهذا هو الحدث الأول).	
٤- عند دوران العمودين ربع لفه ثالثة يكون البنز عند الساعة ٩ ويتحرك العمود المتحرك قصراً فى إتجاه الساعه ٩ حتى يتطابق مع العمود الثابت فى نهاية ربع اللفة هذه تحت تأثير شد البنز للفلنشتين.	
٥- عند دوران العمودين ربع لفه رابعة يكون البنز فى أعلى نقطة عند الساعة ١٢ يعود العمود المتحرك للحركة فى إتجاه الساعه ٣ تحت تأثير إنضغاطه والقابلية لرجوعه لوضعه الأصلى الذى تم تركيبه عليه تاركاً العمود الثابت فى مكانه (وهذا هو الحدث الثانى).	

مما سبق يتضح أن هناك حركتان تحدثان للعمود المتحرك فى الإتجاه الأفقى فى اللفة الواحدة، الأولى تحدث بالحركة من وضع الإزاحة إلى وضع التطابق للفلنشتين (من الساعه ٣ إلى الساعه ٩) ثم العوده (من الساعه ٩ إلى الساعه ٣) فى النصف لفه الأول، أما الثانية فهى الحركة فى نفس الحركة فى نصف اللفة الآخر.

إذاً هما حدثان فى الإتجاه الأفقى فى اللفة الواحدة. وهذا هو تأثير عدم السنترة المتوازى للأعمدة (فى الإتجاه الأفقى).

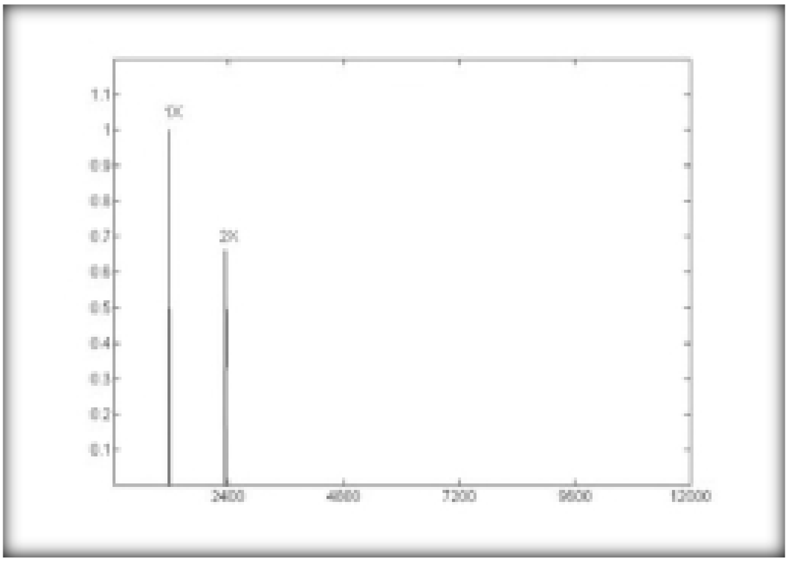
٢-٤-٣- عندما يكون عدم السنترة المتوازى فى الإتجاه الرأسى

ونفس التأثير يحدث فى الإتجاه الرأسى إذا كان عدم السنترة المتوازى للأعمدة (فى الإتجاه الرأسى).

٢-٥- تحليل بصمة الإهتزازات "FFT spectrum"

معظم مشاكل عدم السنترة مزيج "combination" من الزاوى "angular" والمتوازى "offset"، ويتم تحليل القياسات فى الإتجاه الراديال والمحورى للترددات (X١) و(X٢). وبمقارنة قوى عدم الإتزان "imbalance forces" وقوة عدم السنترة "misalignment forces" نجد أن قوى عدم الإتزان هى نفسها فى مواضع "positions" الأفقى والرأسى بينما قوة عدم السنترة نادراً ما تكون ثابتة فى كلتا الموضعين (الأفقى والرأسى).

مثال على إرتفاع الذروة X٢ والتى تظهر مشكلة عدم السنترة.

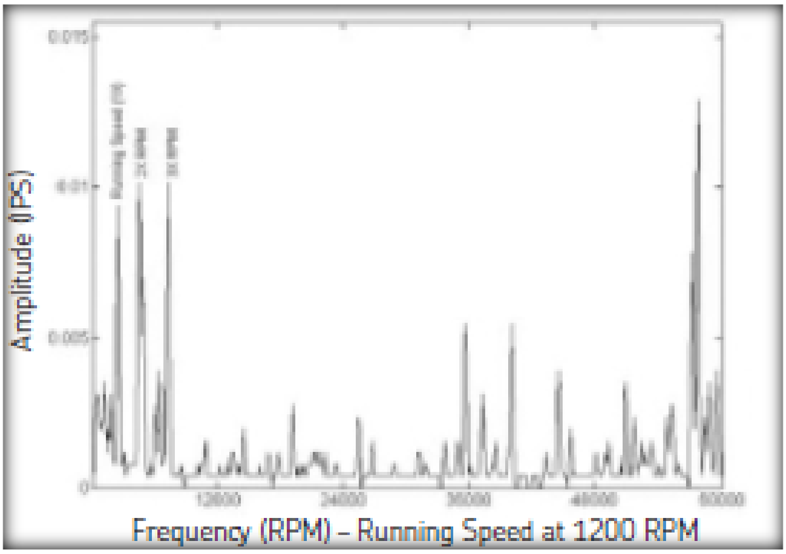


حالة الكوبلنج تكون مقبولة وجيدة ويعمل لفترة طويلة من الزمن عندما تكون السعة X٢ أقل من ٥٠٪ من السعة X١.

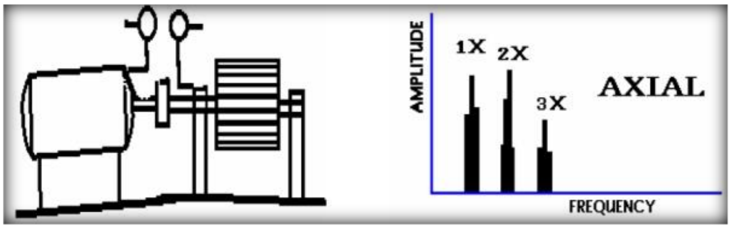
من الممكن حدوث مشكلة للكوبلنج "damage" عندما تكون سعة الإهتزازات عند X٢ تصل إلى ١٥٠٪ من X١.

تكون مشكلة عدم السنترة حادة "severe misalignment" ويجب إصلاحها فى أقرب وقت ممكن عندما يكون إهتزازات الماكينة عند X٢ فوق ١٥٠٪ من X١ أو ربما تحتوى بصمة الإهتزازات على توافقات متعددة من X٣ الى X١٠.

إذا زادت سعة الإهتزازات "vibration amplitude" فى المستوى الأفقى مرتان أو ثلاثة مرات، وهذا يشير إلى مشكلة عدم السنترة.



٢-٥-١- عدم السنترة الزاوى "angular misalignment"



وتسمى أيضاً عدم السنترة الراديال "Radial Misalignment"

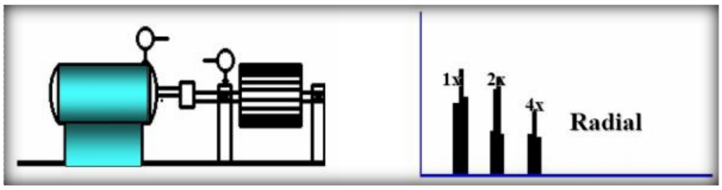
١- يتميز عدم السنترة الزاوى بإرتفاع مستوى الإهتزازات فى الإتجاه المحورى " high axial vibration".

٢- زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه "Out-of-phase" على جانبى الكوبلنج "across the coupling".

٣- إرتفاع مستوى الإهتزازات فى الإتجاه المحورى لكل من ١ RPM X و ٢ RPM X.

٤- ليس من المعتاد هيمنة "dominate" كل من X١، X٢ أو X٣ وذلك لأن تلك الأعراض "symptoms" من الممكن أن تشير إلى مشكلة الكوبلنج "coupling problem".

٢-٥-٢- عدم السنترة المتوازى "parallel misalignment"



١- عدم السنترة المتوازى له أعراض وعلامات "symptoms" مشابهه لعدم السنترة الزاوى "angular misalignment"، ولكنها تظهر إرتفاع فى الإهتزازات فى الإتجاه الراديال " radial vibration".

٢- غالباً ماتكون ١ X RPM أكبر من ٢ X RPM، ولكن إرتفاعها غالباً ما يتحكم فيها نوع وشكل الكوبلنج "coupling type".

٣- عندما يكون مستوى الإهتزازات مرتفع "sever" لأى من عدم السنترة الزاوى " angular misalignment" أو عدم السنترة الراديال "Radial Misalignment"، يمكن أن تظهر فى بصمة الإهتزازات قمم ذات سعات عالية "high amplitude peaks" وتوافقات عالية كثيرة (من ٤X – ٨X) أو حتى سلسلة كاملة من التوافقات عالية التردد ومشابهة فى ظهورها للتفكك الميكانيكى "mechanical looseness".

٤- إذا كان عدم السنترة حاد "sever misalignment" فإن شكل البصمة "spectrum shape" ومقدار السعة "amplitude" يعتمد على نوع وتصميم الكوبلنج "Coupling design".

٥- زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه "Out-of-phase" على جانبى الكوبلنج "across the coupling".

٢-٦- أسباب زيادة الإهتزازات فى الإتجاه المحورى "Axial vibration"

السبب الرئيسى لزيادة الإهتزازات فى الإتجاه المحورى هو عدم سنترة العمود/الكوبلنج. ومعظم عمليات الإهتزازات التى تظهر زيادة الإهتزازات فى الإتجاه المحورى تكون المشكلة فى عدم السنترة. والبعض يستخدم القاعدة وهى عندما يصل مقدار الإهتزازات فى الإتجاه المحورى إلى ٥٠% على الأقل من إهتزازات الإتجاه الراديال (الإتجاه الأفقى أو الرأسى) يكون منبع الإهتزازات ناتج من عدم السنترة.

هذه القاعدة جيدة إلى حد معقول ولكن، للأسف، ليست موثوق بها دائماً. لأن عدم السنترة ليست تعطى دائماً إهتزازات فى الإتجاه المحورى.

هناك العديد من الحالات التى تكون فيها عدم السنترة هو مصدر المشكلة ، وقيمة الاهتزازات فى الإتجاه المحورى منخفضه قد تصل إلى ٢٠ الى ٣٠ في المئة فقط من إهتزازات إتجاه الراديال "radial vibration".

ومن المفترض أن مقدار الإهتزازات فى الإتجاه المحورى تعتمد على نوع الكوبلنج " coupling type" ونوع عدم السنترة إما عدم سنترة متوازى أو زاوى.

وأى مصدر من مصادر الرنيين "resonance" يمكن أن يكبر المستوى القليل لإهتزازات الإتجاه المحورى بحيث يبدو مثل إهتزاز عدم السنترة.

وعندما تكون الإهتزازات فى الإتجاه المحوري عالية، تحقق أولاً من معرفة أسباب أخرى لزيادة الإهتزازات فى الإتجاه المحوري أعلى مما هو معتاد.

وإذا كانت البنود في القائمة الآتية ليست إحدى الإحتمالات فإنه يمكنك الجزم إلي حد ما وبأمان أن الإهتزازات فى الإتجاه المحوري ترجع إلى عدم السنترة:-

١- إنحناء الأعمدة "Bent Shafts".

٢- الأعمدة عندما تكون فى حالة الرنين الناتج عن التيارات الدوامية للزيت "resonant Whirl".

٣- "cocked bearing" معناها وجود زاوية بين الجلبة الخارجية وبيت رولمان البللى "housing" أو الجلبة الداخلية والعمود "shaft".

٤- عدم سنترة رولمان البللى (نادراً "rare"). في بعض الأحيان من الممكن أن يكون رولمان البللى تم سنترته بطريقة خاطئة "misaligned" فى الإطار الخاص به "frame" بطريقة ملتوية "twisted" بإستخدام رقائق "shimmed" موضوعة بطريقة غير سليمة.

٥- الرنين"resonance" الناتج من بعض أجزاء الماكينة فى الإتجاه المحورى "axial direction".

٦- فى حالة (couple unbalance).

٧- فى حالة تهالك "worn" التروس الحلزونية "helical" أو المخروطية "bevel".

٢-٧- تحليل قياسات زاوية الطور "phase analysis"

قياسات زاوية الطور تكون أداه مفيدة جداً لتشخيص عدم السنترة. إذا كان ذلك ممكناً، قياس تغير زاوية الطور "phase shift" بين قراءات الإتجاه المحورى "axial readings" والطرف الآخر المعاكس من الجهة الآخرى للماكينة "opposite ends".

ملحوظة:- كل قيم زاوية الطور"phase values" هى ± ٣٠° بسبب التفاوت الميكانيكي "mechanical variance".

عدم السنترة الزاوي:- فى الإتجاه المحورى، زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه "Out-of-phase" على جانبى الكوبلنج "across the coupling" أو الماكينة.

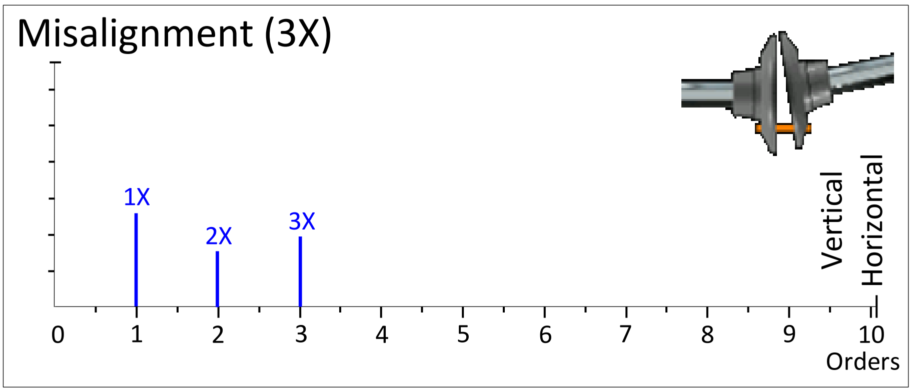
عدم السنترة المتوازي:- فى إتجاه الراديال زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة فى عكس الإتجاه على جانبى الكوبلنج أو الماكينة.

صفر درجة أو ١٨٠ درجة هى زاوية تغير الطور"phase" والتى تحدث كلما تحرك اللاقط من الوضع الأفقى إلى الوضع الرأسى على نفس رولمان البللى.

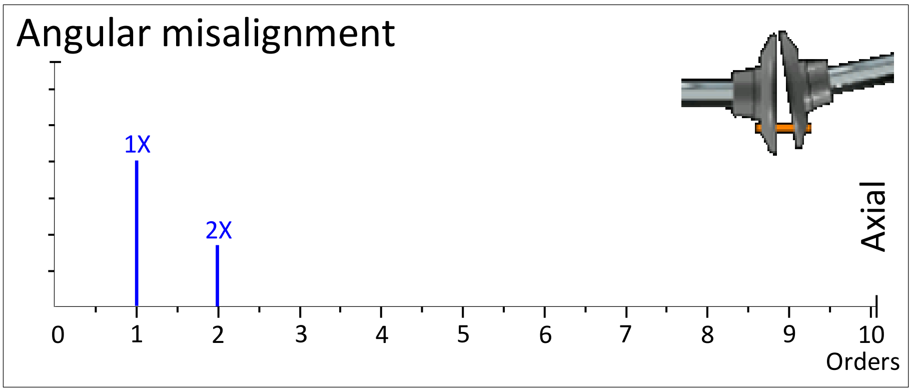
مزيج "combination" من الإثنين السابقين معاً:- فى الإتجاه الراديال والمحورى، زاوية الطور "phase" ١٨٠ درجة ستكون موجودة على جانبى الكوبلنج أو الماكينة.

٢-٨- ملخص عن عدم السنترة

من الوصف السابق لكل من عدم السنترة المتوازى والزاوى، يمكننا أن نلاحظ أن X١ وX٢ وX٣ هى الترددات المهمة، ولكونها مهمة فمن المهم جداً أن نحدد وبدقة سرعة دوران الماكينة.

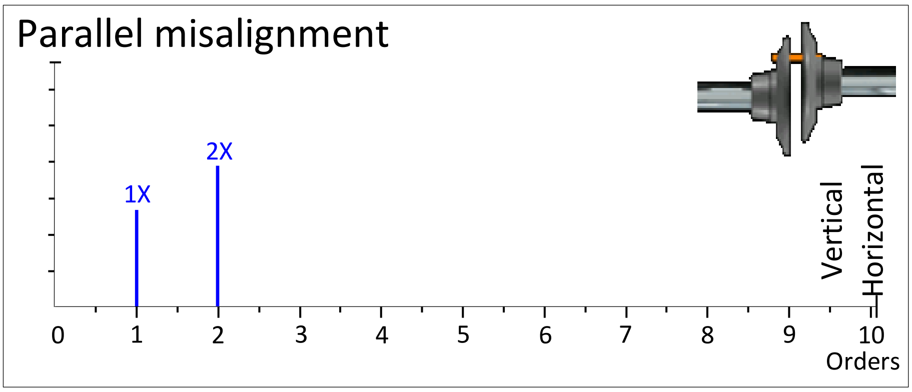


ورأينا أيضاً أنه من الضرورى أن نحلل بيانات الإهتزازات فى الإتجاهات الرأسية والأفقية والمحورية. والقياسات فى الإتجاه المحورى مهمة جداً عند محاولة تشخيص عدم السنترة.



كما لوحظ سابقاً، كل من مستويات الإهتزازات فى الإتجاهين الرأسى والأفقى تكون عالية، على عكس عدم الإتزان، لن تكون بالضرورة متساوية.

وفى الواقع من الممكن لأحدهما أن يكون ضعف الآخر.

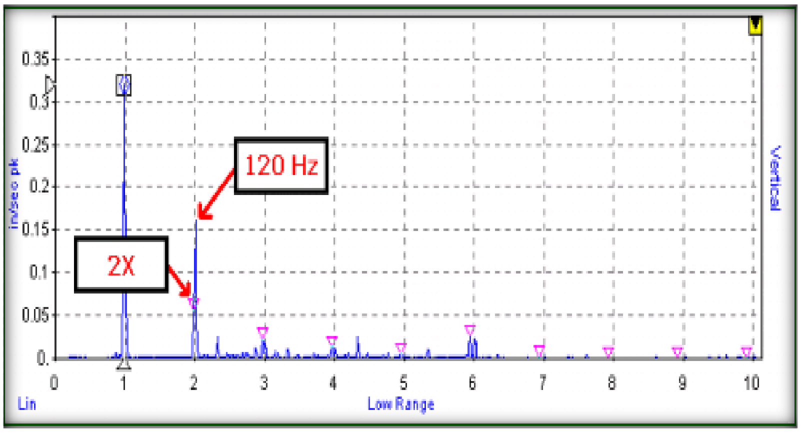


إذا كنت لا تستخدم اللاقط الثلاثى "triaxial accelerometer"، فعليك أن تأخذ قياسات الإتجاه المحورى بشكل منفصل.

ومن الأفضل أخذ قراءة الإتجاه المحورى من الجهة الخارجية لرولمان البللى " outboard bearings" (جمع القراءات من الجهة الداخلية لرولمان البللى "inboard readings" يكون صعباً لوجود غطاء الكوبلنج وضيق المسافة).

تذكر دائماً أن جميع الأجزاء المتدلية "overhung" سوف ينتج عنها إرتفاع فى مستوى الإهتزازات فى الإتجاه المحورى عند X١. وإنحناء الأعمدة "bent shaft" يمكن أن يساء فهمها على أنها عدم سنترة (كما سنرى لاحقاً). ولذلك يجب التفكير جيداً فى الماكينة، وتأكد من تطبيق قواعد التحليل لكل من عدم الإتزان وإنحناء الأعمدة قبل تنفيذ عدم السنترة.

عند ملاحظة قمة عالية عند X٢، تأكد أولاً من أنها ليست ضعف تردد التيار الكهربى " line frequency" (١٠٠ هرتز). حيث أنه من الوهلة الأولى هذه البيانات تبدو وكأنها ضعف سرعة الدوران X٢. وفى الواقع هذه القمة هى مزيج من X٢ و١٠٠ أو ١٢٠هرتز.



وإذا رأيت قمة عند X٢ وهى فى الواقع ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز، يجب التحقق من أسباب هذه القمة، ولكن أيضاً واصل الفحص والتحقق اللازم لعدم السنترة.

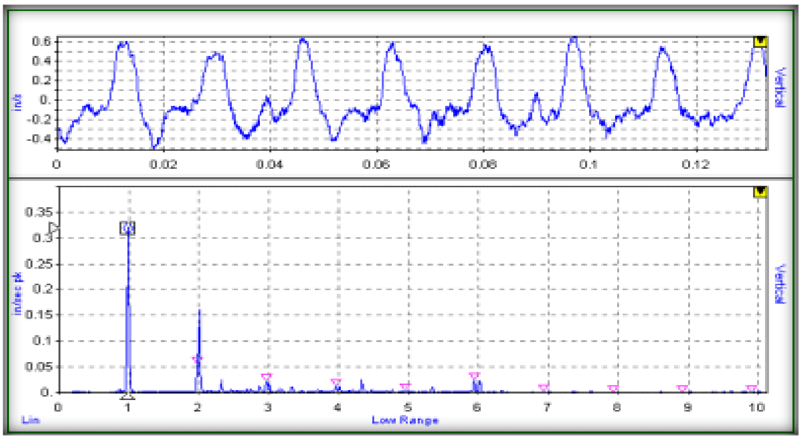
الشكل الموجى "time waveform" ليست مفيدة بالقدر اللازم. وإذا وجدنا قمة مهيمنة عند X١ فى الإتجاه المحورى، من الممكن أن نتوقع أن الشكل الموجى عبارة عن موجه جيبية جيدة. وإذا وجدنا قمة قوية عند X٢ ومعها بعض X١، الشكل الموجى سيكون بـi بعض التموجات أو بعض التمايل "wobble".

وينطبق الشئ نفسه على قياسات زاوية الطور "phase measurements" على جانبى الكوبلنج. عند مقارنة قراءات X١ فى الإتجاه الأفقى والرأسى فإنهما يكونان إما فى نفس الإتجاه "in-phase" أو ١٨٠ درجة عكس الإتجاه "out of phase".

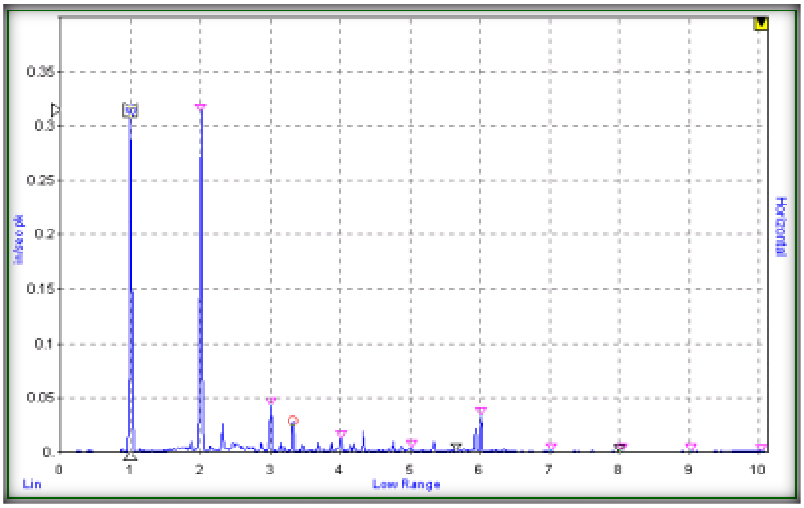
مثال ١:-

موتور بقدره قدرها ٢٠ حصان يقود طلمبة طرد مركزى "centrifugal pump" من خلال كوبلنج مرن "flexible coupling". وسرعة الموتور ٣٥٥٠ RPM. وعدد ريش حدافة الطلمبة ٦ ريش "vanes".

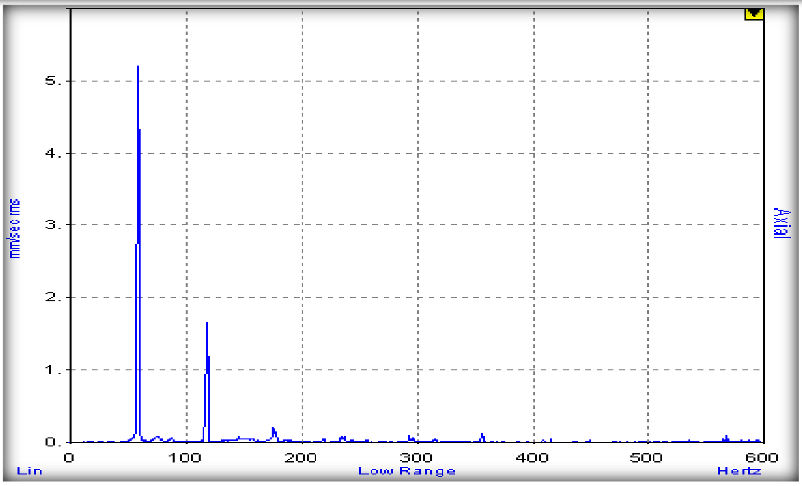
إذا بدأنا مع البيانات الرأسية للمضخة يمكننا أن نرى قمة عالية عند X١ وبعض الاهتزاز عند X٢. إرتفاع القمة عند X٢ هى علامتنا الأولى.



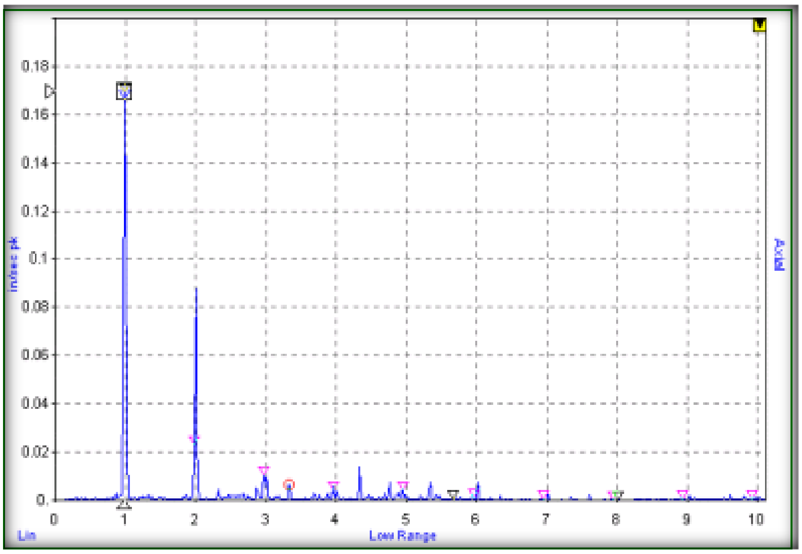
ننظر إلى بيانات بصمة الإهتزازات فى الإتجاه الأفقى. يمكننا أن نرى قمم عالية عند كل من X١ وX٢ ونرى أيضاً قمة صغيرة عند X٣.



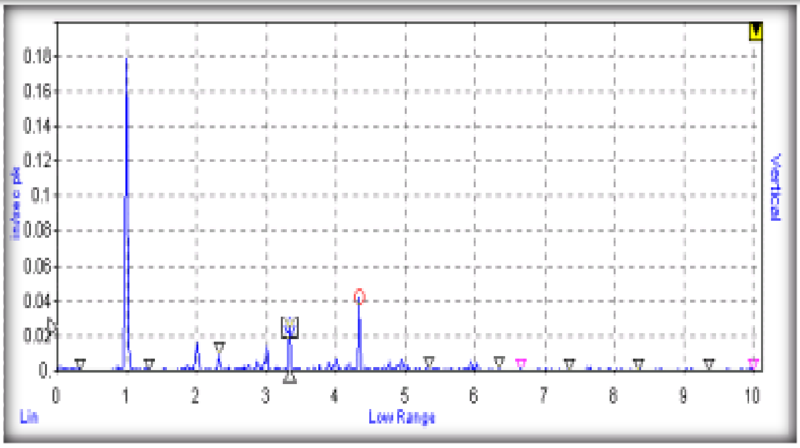
ولكن ماذا نرى فى الإتجاه المحورى؟ يمكننا أن نرى قمة عالية عند X١، وكما هو متوقع (القمة عند حوالى X٢ هى كما قلنا سابقاً مزيج من X٢ وضعف التردد الكهربى). وهذا يؤكد تشخيص عدم السنترة، ولاحظ أن مقياس الرسم مختلف – وسعة قمة X١ فعلياً أقل من المستويات التى رأيناها فى الإتجاه الرأسى والأفقى.



وإذا رجعنا للقياسات السابقة نرى أن السعة كانت عالية (ولاحظ أن مقياس الرسم مختلف). وهذا قد يكون عدم السنترة الناتج من التمدد الحرارى، ولكن وقت الإختبار الأخير لم يكن هناك إجهادات على الماكينة من أعمال الإنابيب.



بالمناسبة، إذا درسنا بيانات الموتور والطلمبة عن قرب، سوف نرى وجود علامات لتآكل رولمان البللى. وبيانات كل من الموتور والطلمبة فيها ترددات جانبية "sidebands" من X١ (من الممكن أن تكون مشكلة الجلبة الداخلية). وليس ذلك غريباً نتيجة كمية عدم السنترة وطول الفترة الزمنية التى كانت فيها الماكينة خارج المحازاة.



٢-٩- الأساليب المستخدمة لعمل محاذاة للأعمدة

عدم السنترة مشكلة شائعة، وهى مهمة لأن زيادة قوة الدوران تسبب إجهادات لا داعى لها لكل من مانع التسريب "seals" ورولمان البلى "bearings".

وفى قسم الصيانه ناقشنا جزءاً رئيسياً من "الصيانة الاستباقية" "Proactive Maintenance" وهى تقلل من مشاكل عدم السنترة وبالتالى تقليل حالات الأعطال الثانوية "secondary" وعدم زيادتها.

وإذا إستخدمنا أجهزة الضبط الدقيق لمحاور الماكينات بإستخدام شعاع الليزر "precision align" وكذلك عمل الإتزان الدقيق، سوف تكون المعدات أكثر موثوقية "more reliable".



وأفضل محاذاه تحدث لأى ماكينة هى التى تتم دائماً فقط فى درجة حرارة التشغيل حيث أن عملية السنترة تتأثر بالتمدد الحرارى "thermal expansion" والإنكماش "contraction" ويستحسن قياس الإهتزازات لتشخيص مشكلة عدم السنترة فى درجة حرارة التشغيل العادية للماكينة.

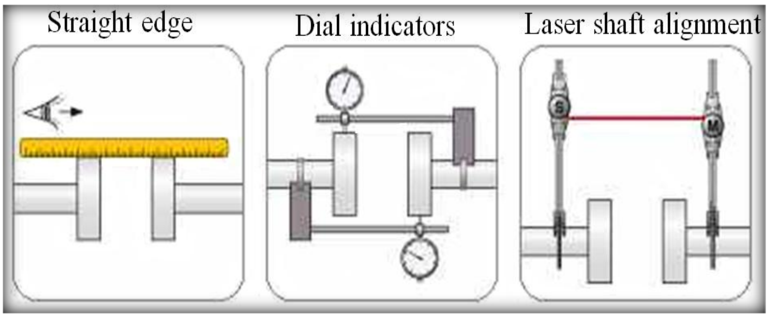
والأساليب المستخدمة لعمل السنترة هى:-

١- المسطرة العدلة (الإدة) "straightedge"، فقيرة فى الدقة "poor"، سريعة فى الضبط "good"، وسهولة فى الإستخدام "good".

٢- جهاز الضبط بإستخدام الساعة "dial indicators"، جيدة فى الدقة "poor"، بطيئة فى الضبط "poor"، وصعوبة فى الإستخدام "poor".

٣- نظام ضبط المحاذاه بشعاع الليزر "laser alignment"، جيدة فى الدقة "poor"، سريعة فى الضبط "good"، وسهولة فى الإستخدام "good".

وباختصار، فإنه من الواضح أن نظام ضبط المحاذاه بشعاع الليزر "laser alignment" هو أسرع وأسهل في الإستخدام من جهاز الضبط بإستخدام الساعة "dial indicators"، حيث يكون أكثر دقة ولا يتطلب مهارات خاصة "special skills" للحصول على نتائج دقيقة في كل مرة.

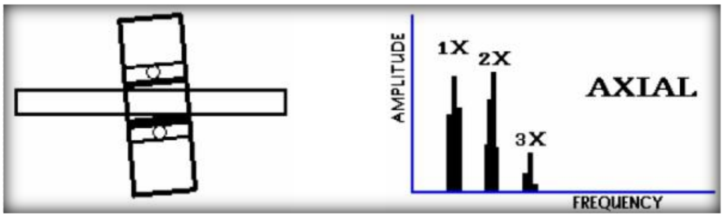


٢-١٠- عدم سنترة رولمان البلى "Misaligned bearing"

١- أعراض الإهتزازات مشابه لعدم السنترة الزاوى "angular misalignment".

٢- أى محاولة لإعادة سنترة الكوبلنج أو عمل إتزان للعمود الدوار لا تخفف "not alleviate" من حدة المشكلة.

٣- سوف يتسبب فى إلتواء الحركة "twisting motion" بما يقرب من ١٨٠ درجة " phase shift" من جانب إلى آخر"side to side" أو من أعلى إلى أسفل "top to bottom".



٣- التفكك الميكانيكى "Mechanical looseness"

مقدمه:-

إننا فى حاجة إلى مناقشة وجود التفكك الميكانيكى "mechanical looseness"، والذى يتجلى فى صورة توافقات "harmonics" لسرعة الدوران (X١)، وهو التفكك الناتج من قواعد الهياكل الخرسانية "Structural Looseness" أو قواعد رولمان البلى "bearing pedestal " أو من أن التثبيت أو التربيط غير مناسب بين الأجزاء، وبصمة الإهتزازات تتميز عادةً بوجود سلسلة طويلة من توافقات تردد سرعة الدوران "rotating frequency harmonics" أو نصف سرعة الدوران وتوافقاتها عند زيادة السعة بشكل غير عادى.

وقد تكون هذه التوافقات متفرقة على سبيل المثال التفككات قد تظهر قمم "peak" عند (X٢،X٣، X٤ ، X٥ ، X٦ ،إلخ) أو(X٣، X٣,٥، X٤، X٥,٥ ، X٦ ،إلخ).

التفكك الميكانيكى إتجاهى للغاية "highly directional" فى كثير من الأحيان ومن الممكن أن يحدث بشكل ملحوظ بقراءات مختلفة إذا قمت بمقارنة القراءات حول محيط رولمان البللى فى إتجاه الراديال وبزيادة ٣٠ درجة فى كل مرة.

ولاحظ أيضاً أن التفكك الميكانيكى غالباً ما يحدث مضاعفات "multiples" للترددات الثانوية "Sub-harmonic" عند ١/٢ أو ١/٣ X RPM (سرعة الدوران) (٠,٥ ، ١,٥ و ٢,٥ X إلخ).

الأسباب المحتملة للتآكل/التفكك "wear/looseness":-

- تفكك الماكينة نتيجة لسوء تثبيتها على القاعدة.
- تفك الماكينة نتيجة لتفكك أجزائها.
- تفكك أجزاء رولمان البللى أو تفكك تثبيت الكرسى المثبت عليه البللى "bearing seat".

تأثير التفكك الميكانيكى

١- إذا كان التفكك نتيجة رولمان البللى، وتأثيره مشابة لعدم الإتزان، سيكون أكثر حدة.

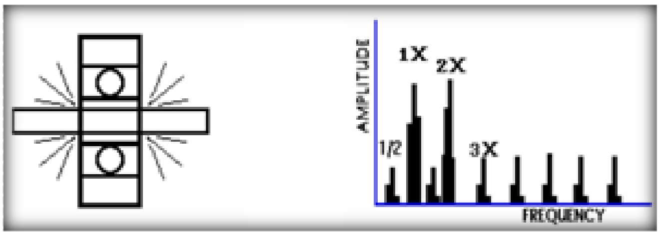
٢- إذا كان التفكك نتيجة جزء من أجزاء الماكينة (ريش المروحة)، هناك إحتمال لأن يصبح هذا الجزء سبب فى أضرار ثانوية "secondary damage".

٣-١- تشخيص التفكك الناتج من الحركة الدورانية والغير الدورانية "rotating and non-rotating looseness"

سوف نناقش التفكك الذى ينتج عنه قمة كبيرة عند (X١). وفى الحقيقة يوجد نوعان من التفكك. النوع الأول هو تفكك ناتج من الحركة الدورانية "rotating looseness" وينتج عنه تفكك مفرط بين الأجزاء المتحركة والثابتة للماكينة كما هو الحال فى رولمان البللى. والنوع الثانى وهو تفكك ناتج من الأجزاء الثابتة والغير متحركة مثل أرجل الماكينة مع القاعدة أو بيت البلية " bearing housing" أو كرسى رولمان البللى والماكينة.

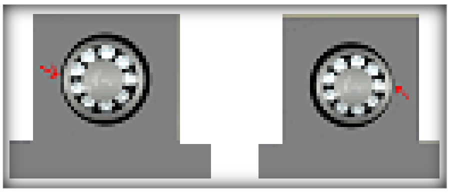
٣-١-١- النوع الأول وهو التفكك الناتج من الحركة الدورانية "rotating looseness"

التفكك الناتج من الحركة الدورانية يحدث نتيجة التآكل فى رولمان البللى. ففى البداية نكتشف أعراض التآكل فى رولمان البللى يتبعها تفكك رولمان البللى.

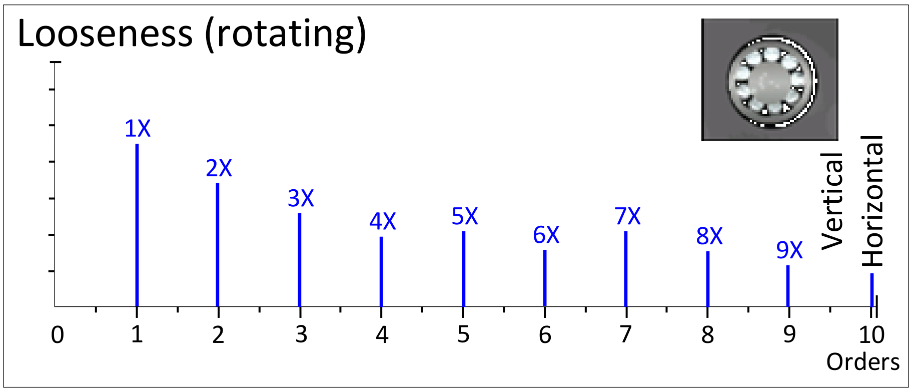


ويمكن أن يحدث بسبب تثبيت غير مناسب بين الأجزاء والتفكك الزائد "excessive clearance" فى كل من رولمان البلى وجلب السبائك "sleeve" وتفكك تثبيت رولمان البلى على العمود "shaft" أوتفكك الحدافة "loose impeller" على العمود "shaft" ويتسبب ذلك فى وجود توافقات "harmonics" كثيرة فى بصمة الإهتزازات و أيضاً تقطع "truncation" لشكل الموجة الزمنية "time waveform".

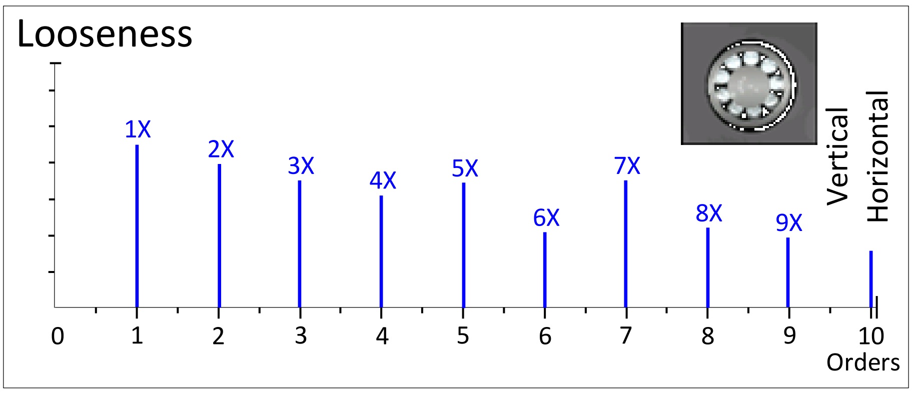
والطور "Phase" فى هذا النوع غالباً ما يكون غير مستقر "unstable" ومن الممكن أن يتغير على نطاق واسع من قياس إلى القياس الذى يليه، خاصة عند تغير وضع العمود الدوار من تشغيل إلى آخر "start-up".



الخلوصات الزائدة فى كراسى السبائك "sleeve– journal" وتفكك ورولمان البلى ينتج عنها توافقات من (X١) وممكن أن تزيد هذه التوافقات فى بعض الحالات إلى أكثر من (X١٠).

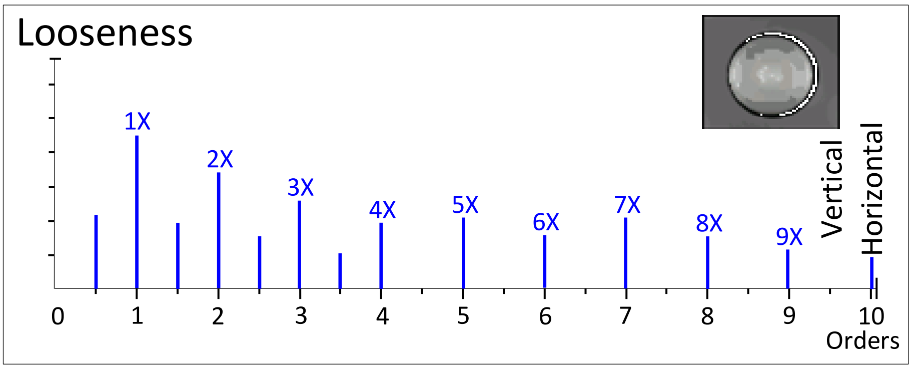


عندما تسوء حاله التفكك تزداد السعة ويزداد عدد التوافقات. بعض القمم سوف تكون أكبر من الأخرى عندما تتوافق مع رنين هيكل الماكينة "structural resonances" أو أى مصدر من مصادر الإهتزازات، على سبيل المثال تردد الريش "vane pass frequency".

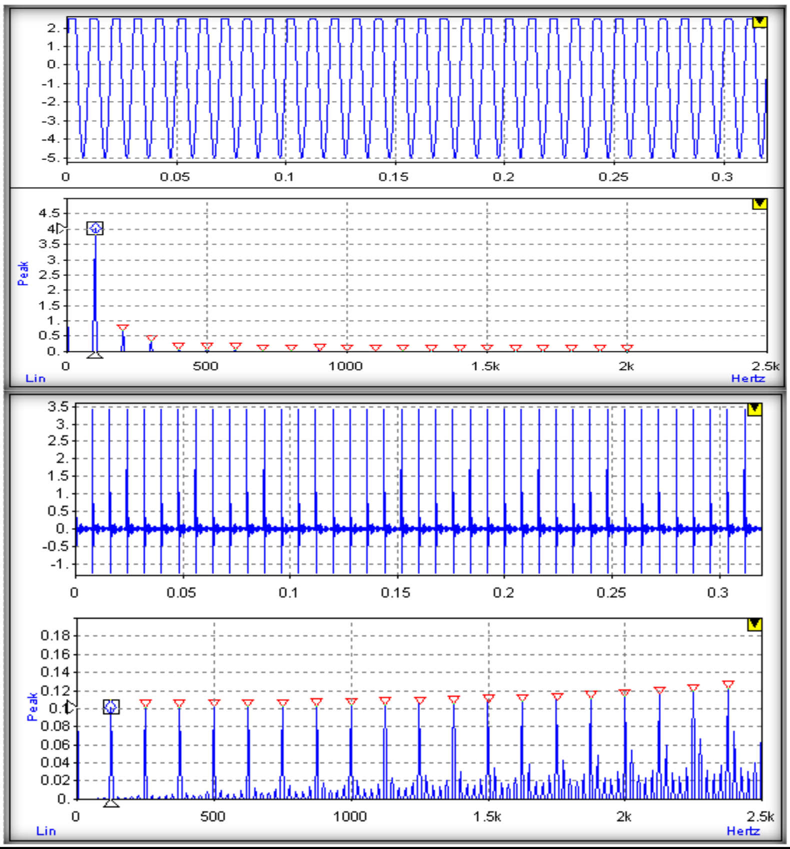


الخلوصات الزائدة فى كراسى السبائك "sleeve – journal" يمكن أن ينتج عنها أيضاً توافقات عند (X٠,٥) كما هو مبين أدناه. وتسمى توافقات النصف أوردر (half order) أو الترددات الفرعية من سرعة الدوران "Sub-synchronous".

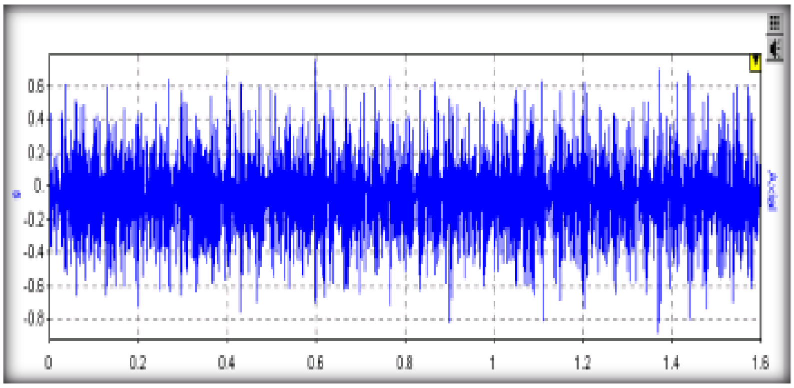
أى الترددات الأقل من سرعة الدوران (1 order). وهى يمكن أن تنتج من الإحتكاك أو من الصدمات الشديدة "severe impacting". ومن الممكن ظهور توافقات من الثلث أوردر "1/3order".



وإذا إستعرضنا سريعاً نظرية الموجة المقصوصة "clipped sine wave" نرى أنه ينتج عنها توافقات (X١، X٢، X٣، X٤، X٥ وهلم جرا)، بينما الصدمات "impacting" أو الأحداث اللحظية العابرة "Transients" ينتج عنها توافقات النصف أوردر (half order) (X٠,٥، X١، X١,٥، X٢، وهلم جرا).



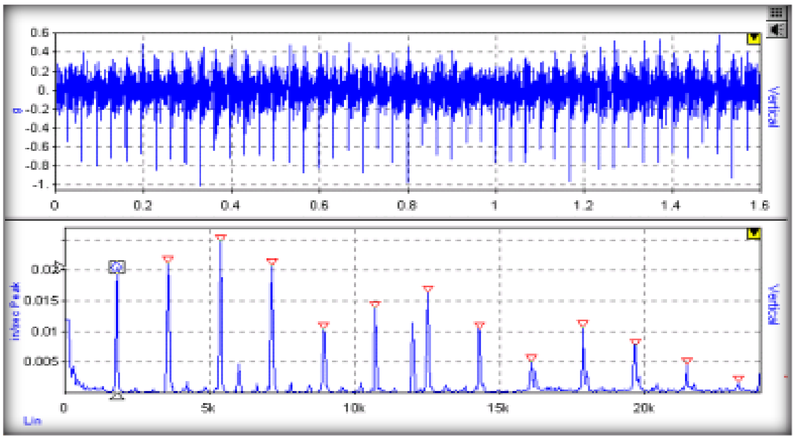
الشكل الموجى من الممكن أن يكون مفيد جداً عند تشخيص (أو تأكيد) مشكلة التفكك. وكلما زادت حدة التفكك، نلاحظ قص أو قطع فى الشكل الموجى "truncation"، وفيما بعد سوف نلاحظ صدمات فى الشكل الموجى "impacts". والإهتزازات تظهر وكأنها عشوائية "random" فى طبيعتها – وهذه علامة مؤكدة "sure sign" على التفكك.



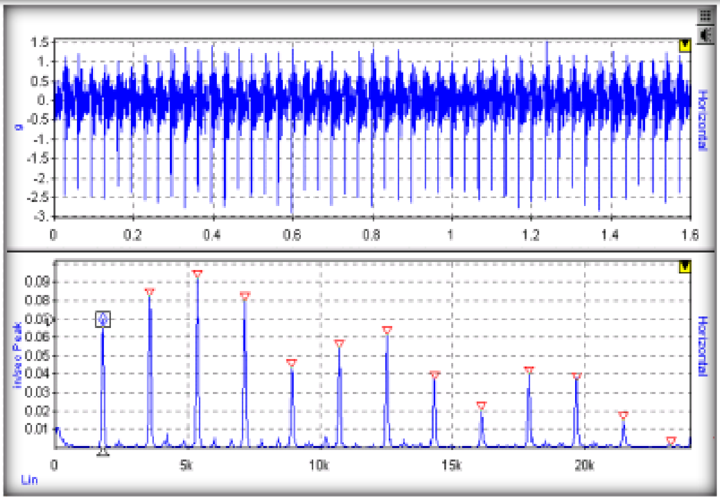
زاوية الطور من الممكن إستخدامها للتأكيد على التفكك، ولكنها تستخدم للتأكد من عدم وجود مشكلة أخرى. والزاوية النسبية بين مختلف الأماكن والمحاور ستكون عشوائية فى طبيعتها.

مثال:-

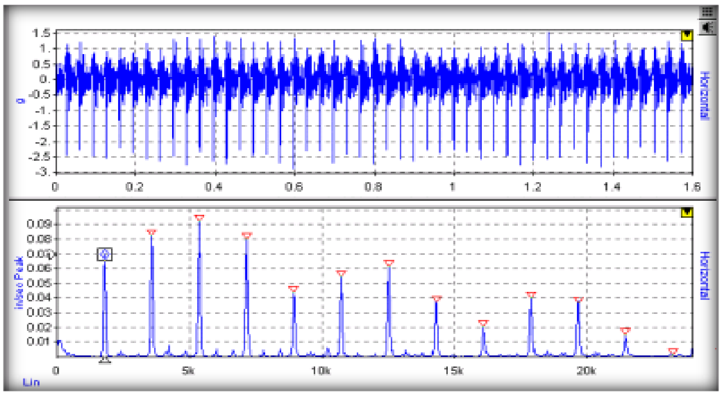
المثال يوضح حالة تفكك شديدة فى قاعدة رولمان البللى "bearing pedestal" مما يجعله يهتز بشدة.



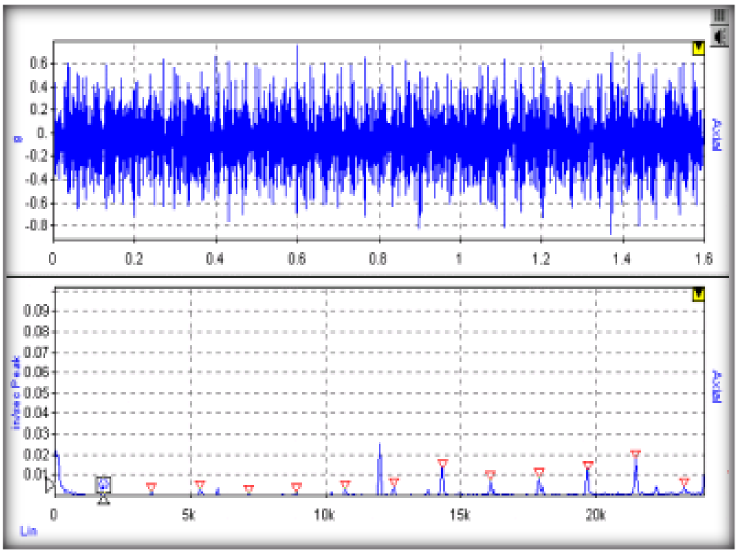
والتوافقات تكون واضحة جداً فى الإتجاه الرأسى "vertical direction"، ويرجع ذلك إلى وجود نوع آخر من التفكك وهو "non-rotating" أو مرونة الأرضية "foundation flexibility" ومستوى الإهتزازات فى الإتجاه الأفقى "horizontal direction" أعلى ثلاث مرات تقريباً.



يمكننا أن نرى بوضوح مقدار الشكل الموجى "time waveform" فى هذا المثال. والأحداث اللحظية العابرة "Transients" من الهز أو الإرتطام (صدمات دورية) "periodic impacts" واضحة جداً.

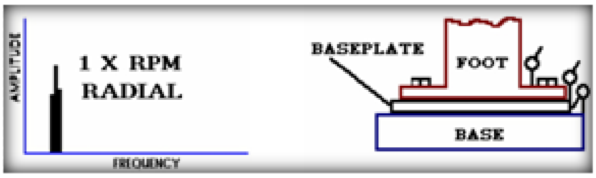


كما قد نتوقع، لو نظرنا إلى الإتجاه المحورى، نجد أنه مازالت التوافقات موجودة، ومستوى السعة سيكون قليلاً – أقل من ١/٢٠ من المستوى.

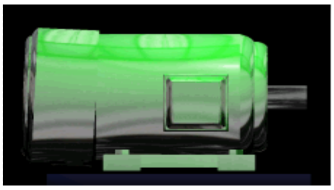


٣-١-٢- النوع الثانى وهو التفكك الناتج من الحركة غير الدورانية "non-rotating looseness"

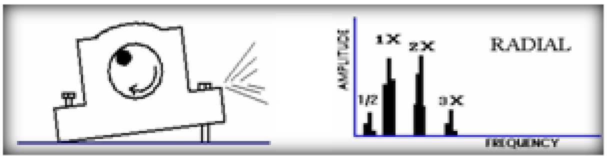
التفكك الناتج من الحركة غير الدورانية ويمكن أن يحدث بسبب تفكك أساسات أو قواعد الآلات والمعروفة بالهيكل الخرسانى "structural looseness"، أو تفكك أرجل الماكينة مع القاعدة أو بيت البلية "bearing housing" أو كرسى رولمان البلى والماكينة وضعف القاعدة المعدنية "baseplate" أو الأرضية "foundation"، تدهور "grouting"، تفكك مسامير الماكينة عند القاعدة "loose hold-down bolts" وتشوه هيكل قاعدة الماكينة "frame or base" مما يسبب مشكلة السوفت فوت "soft foot".



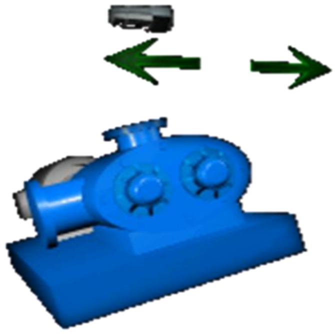
وتفكك أغطية المواتير، تفكك الهيكل المعدنى وكأنه ملامس فقط للموتور، تفكك غطاء الكوبلنج "loose guards" وإلخ.



ويمكن أن يحدث بسبب تفكك مسامير كراسى التحميل "pillow block"، تشقق "cracks" فى هيكل قاعدة الماكينة "frame or base" أو قاعدة رولمان البلى "bearing pedestal". ومن الممكن أن تظهر فى بصمة الإهتزازات ترددات عند X٠,٥ ، X١,٥ و X٣ (من سرعة الدوران).



التفكك بين الماكينة وأرضيتها سوف يزيد من إرتفاع (X١) فى الإتجاه الأقل صلادة " least stiffness". وعادةً مايكون هذا الإتجاه هو الأفقى، ويعتمد أساساً على شكل المخطط الطبيعى للماكينة.



وبتحليل زاوية الطور "Phase analysis" سوف تظهر ١٨٠ درجة تقريباً تغير فى الطور " phase shift" بين كل من الإتجاه الرأسى (العمودى) "vertical direction" وعلى كل من أرجل الماكينة "machine feet" ، القاعدة المعدنية "baseplate" والقاعدة نفسها "base".

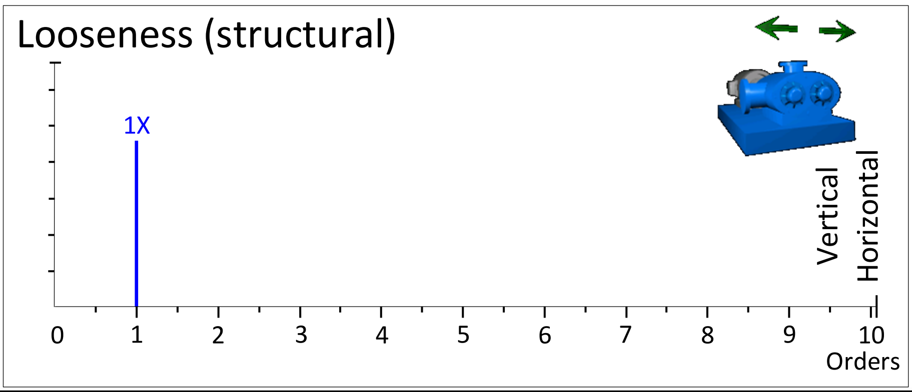
ومن الشائع ما يحدث توافقات مع سرعة الدوران (X١) إذا كان التفكك شديد. ومن الصعب معرفة مشكلة عدم الإتزان "imbalance" من تفكك أو مرونة القاعدة "foundation"، وخاصة للماكينات الرأسية "vertical machines".



وإذا كانت (X١) فى الإتجاه الأفقى أكبر بكثير "much greater" من (X١) فى الإتجاه الرأسى، يكون التفكك متوقعاً. وإذا كانت (X١) فى الإتجاه الأفقى أقل من أو يساوى (X١) فى الإتجاه الرأسى، يكون عدم الإتزان متوقعاً.

مرونة الأرضية أو تفككها "Foundation flexibility" تحدث نتيجة كل من تفكك المسامير " loose bolts"، التآكل "corrosion"، شروخ "cracking" فى تثبيت الأجهزة.

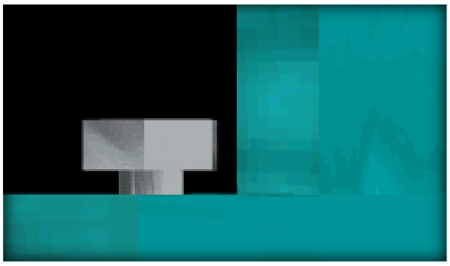
ملاحظة:إذا كانت الماكينات مثبتة بطريقة مرنة، ستكون الإهتزازات دائماً كبيرة فى المحور الأفقى.



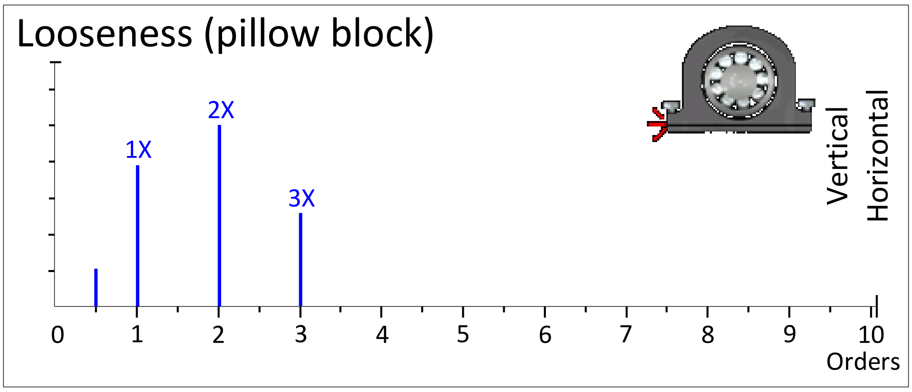
زاوية الطور من الممكن إستخدامها للتأكيد على هذه الحالة من حالات التفكك، وفرق زاوية الطور "phase difference" هو ١٨٠ درجة بين الماكينة والقاعدة "base" فى الإتجاه الرأسى " vertical direction".



تفكك قاعدة رولمان البلى "Loose pedestal bearing" سوف يظهر خواص مختلفة فى بصمة الماكينة.

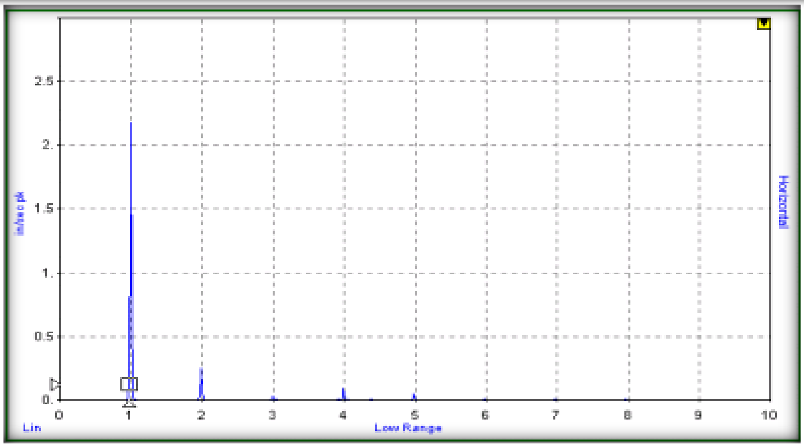


زاوية الطور من الممكن إستخدامها للتأكيد على هذه الحالة من حالات التفكك، وفرق زاوية الطور "phase difference" هو ١٨٠ درجة بين الماكينة والقاعدة "base".



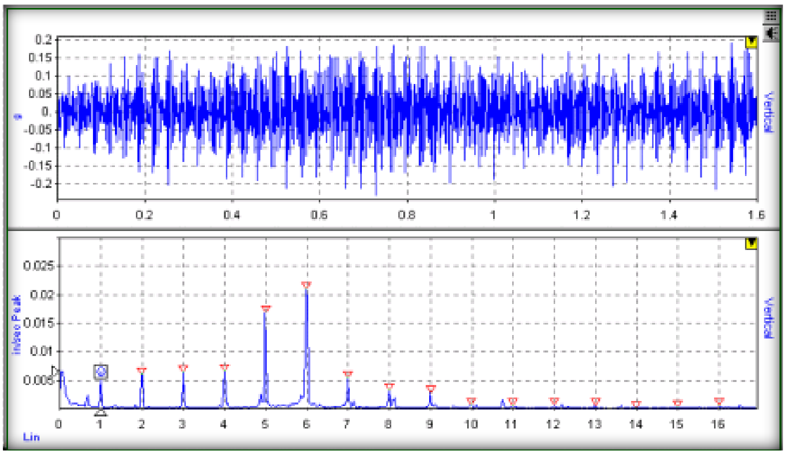
المثال الأول:-

يمكن إستخدام هذا المثال كحالة من حالات عدم الإتزان. وبالرغم من وجود مؤشرات محددة لعدم الإتزان وهو إرتفاع مستوى الإهتزازات عند (X١) ومستوى الإهتزازات أعلى بكثير فى المحور الأفقى وهذا يشير إلى وجود مرونة فى الأرضية "foundation flexibility".



المثال الثاني:-

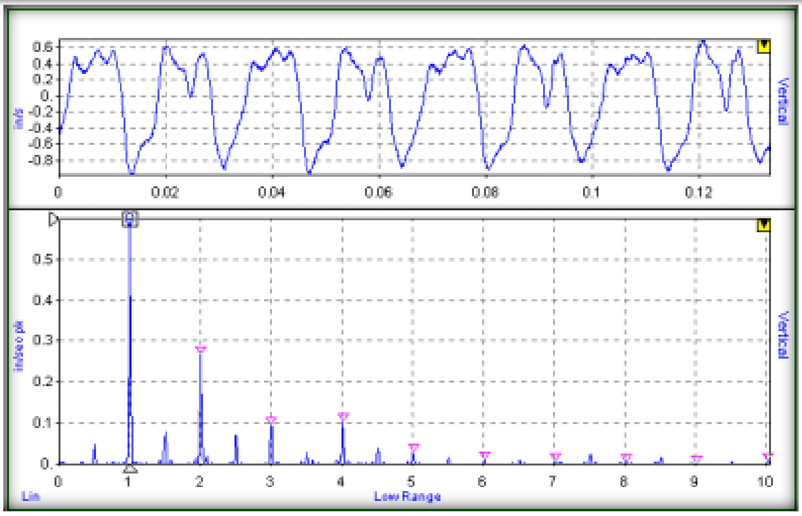
طلمبة طرد مركزي متدلية "overhung centrifugal" وعدد ريش الحدافة ٦ يقودها محرك ٢٠ حصان، بالرغم من أن مستوى السعة ليس عالياً حتى الآن، فإن البيانات تظهر سلسلة قوية من التوافقات، والشكل الموجى يظهر وجود إهتزازات عشوائية "random vibration". مع ملاحظة أن الشكل الموجى تم قياسه بوحدة العجلة "acceleration" والذى يميل إلى التأكيد أو ظهور الترددات العالية.



المثال الثالث:-

محرك كهربائي للتيار المتغير يقود طلمبة طرد مركزي وعدد ريش الحدافة ٤. وسرعة تشغيل المحرك هو ٣٥٨٠ دورة في الدقيقة. والكوبلنج من النوع المرن "flexibly couple".

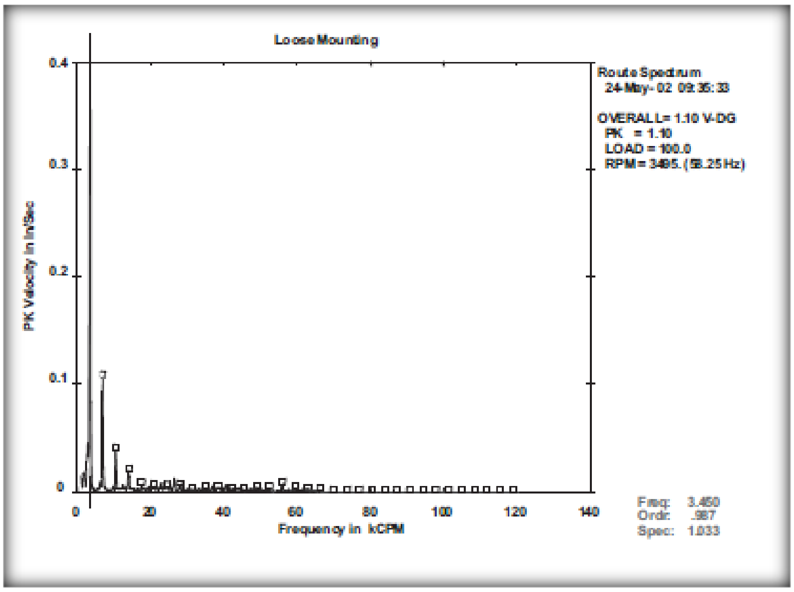
إذا ألقينا نظرةً على بيانات الإهتزازات، يمكننا أن نرى توافقات من (X١)، وأيضاً مستوى التوافقات ليست كبيرة، ونرى أيضاً توافقات من ٢/١ أوردر (half-order)، مما يوحى بأن التفكك أصبح شديداً "severe".



المثال الرابع:-

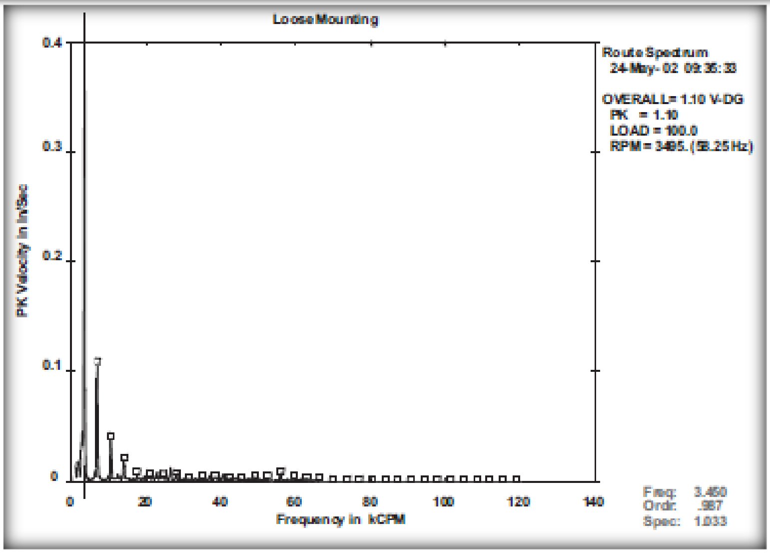
يعرف التفكك الميكانيكى بأنه إرتفاع غير عادى فى سعة سرعة الدوران متبوعة بمضاعفات أو ١/٢ سرعة الدوران متبوعة أيضاً بمضاعفات "multiples".

قمم هذه التوافقات "Harmonic peaks" قد تنخفض فى السعة عند زيادة التردد (ماعدا X٢ عند القياس فى الإتجاه الرأسى من الممكن أن تكون أعلى فى السعة). ويظهر هذا التفكك عادةً كما ببصمة الإهتزازات الآتية:-



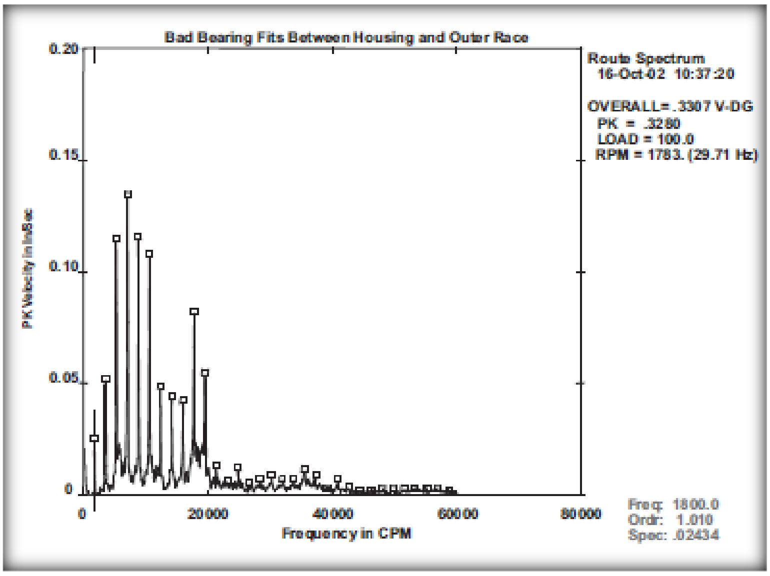
المثال الخامس:-

فى المقابل، التفكك الميكانيكى ينتج من تفكك مسامير التثبيت "mounting bolts" أو تشققات "cracks" فى إطار القاعدة "frame structure" أوقاعدة البللى "bearing pedestal" وتكون بصمة الإهتزازات مشابهة كما بشكل البصمة التالية.



المثال السادس:-

وقد تكون بصمة الإهتزازات بها سلسلة من توافقات سرعة الدوران " running speed harmonics" (تصل إلى ١٠ أو ٢٠ مرة) وهو تفكك ناتج من مشكلة التآكل/التفكك "wear/looseness" كما ببصمة الإهتزازات الآتية.



٣-٢- ملخص

١- إذا وجدت توافقات من سلسلة تتكون من ثلاثة أو أكثر من سرعة الدوران أو ٢/١ سرعة الدوران (المدى X٢ إلى X١٠)، وسعتها أكبر من ٢٠٪ من X١، من المكن أن تكون المشكلة تفكك ميكانيكى.

٢- إذا كانت الماكينة متصلة بشكل مباشر "rigidly connected" أى لا يوجد كوبلنج أو سيور "no coupling or belt"، وسعة X٢ فى الإتجاه الراديال عالية، من المكن أن تكون المشكلة تفكك ميكانيكى.

٤- رولمان البللى "Rolling element bearings"

مقدمه:-

رولمان البللى موجود فى عدد كبير من الماكينات، وهو المسئول عن العديد من حالات الإنهيار. ورولمان البللى مصمم للعمل كثيراً ولسنين عديدة والمشكلة الحقيقية هو فى كيفية التعامل معه بشكل صحيح فى نظام التشحيم وطريقة التركيب وخلافة.

ولقد أظهرت الخبرة العملية فى العديد من السنوات أن أقل من ١٠٪ من جميع رولمان البللى سوف تعمل حتى نهاية العمرالتصميمى "design lifetime". وحوالى ٤٠٪ من إنهيار رولمان البللى من عدم ملائمة نظام التشحيم "improper lubrication"، وحوالى ٣٠٪ من حالات الفشل من سوء التركيب "improper mounting"، (عدم ضبط المحاور أو "cocking"). وحوالى ٢٠٪ لأسباب أخرى، مثل الحمل الذائد وعيوب التصنيع، إلخ.

ولزيادة متوسط عمر رولمان البللى يجب أن تحقق هذه الشروط الأساسية الآتية:-

١- التشحيم "lubrication" يتم فى الوقت المناسب وبالنوع المناسب والكمية المطلوبة.

٢- التركيب "mounting" يتم بالشكل الصحيح.

٣- مواصفات وأبعاد رولمان البللى تتفق مع مواصفات التطبيق.

٤- توريد رولمان البللى خالى من العيوب "defect-free".

٥- إتباع توصيات الصيانة "recommended maintenance".

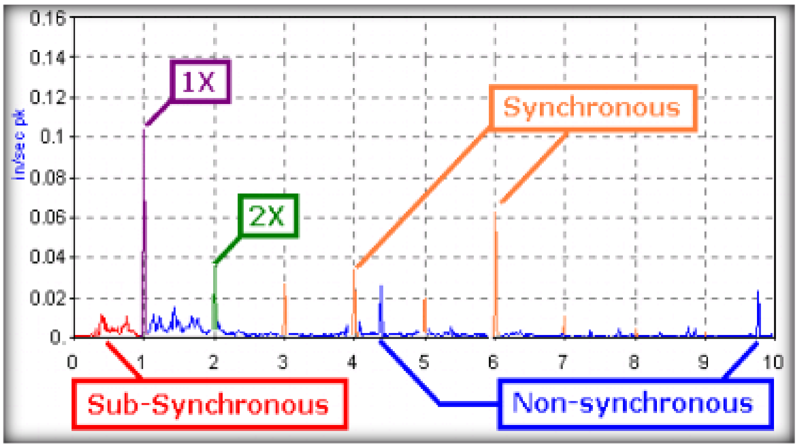
ومن المعروف أن الماكينات الدوارة تصبح أكثر موثوقية وتعمل حتى نهاية العمر المصممة عليه إذا كانت تعمل خارج نطاق تردد الرنين الحرج وكان كل من التشحيم والإتزان وضبط المحاور تم تنفيذهم بالشكل الصحيح وفى الحدود المسموحه.

وللأسف هذا لايتحقق فى العديد من (معظم) المواقع الصناعية وبالتالى تحدث الإجهادات "fatigue" والتآكل "wear" وينهار رولمان البللى قبل الأوان. ومن خلال تحليل الإهتزازات وتحليل الزيوت وكلاهما مثالى لهذا النوع من التطبيقات وبذلك يمكننا الكشف المبكر على علامات الإنذار المبكرة وتقييم حدة المشكلة.

٤-١- كيفية البحث فى بصمة الإهتزازات لإكتشاف مشاكل رولمان البللى

أى مشكلة فى رولمان البللى سوف تظهر فى بصمة الإهتزازات وهى ترددات ليست مطابقة لسرعة الدوران أو مضاعفاتها (X١). وبعبارة أخرى ترددات غير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous".

وجود ترددات غير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous" فى بصمة الإهتزازات هى العلم الأحمر "red flag" لمهندس تحليل الإهتزازات بأن مشاكل رولمان البللى قد تكون موجودة، والمحلل يقوم بالتأكد من أن هذه الترددات ليست تابعة لمصادر أخرى للتأكد من التشخيص.



وفى البداية سوف نلقى نظرة على الترددات التى يمكن أن تتولد عندما ينهار رولمان البللى. وسوف ندرس مختلف المراحل "various stages" التى يمر بها تآكل رولمان البللى "bearing wear".

٤-٢- المشاكل الأكثر شيوعاً لرولمان البللى

أى مشكلة فى رولمان البللى سوف تظهر فى بصمة الإهتزازات ترددات ليست مطابقة لسرعة الدوران أو مضاعفاتها (X١). وبعبارة أخرى ترددات غير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous". والمحلل يقوم بالتأكد من أن هذه الترددات ليست تابعة لمصادر أخرى للتأكد من التشخيص.

وهذه الترددات الغير متزامنة مع سرعة الدوران "non-synchronous" فى بصمة الإهتزازات هى العلم الأحمر "red flag" لمهندس تحليل الإهتزازات بأن مشاكل رولمان البللى قد تكون موجودة، وإذا كان هناك أيضاً توافقات لهذة الترددات "harmonics" ومحاطة على الجانبين "sidebands" فإن إحتمالات وجود مشكلة فى رولمان البللى تصبح عالية جداً وربما لا تحتاج إلى معرف الترددات القسرية لرولمان البللى.

مشاكل رولمان البللى الأكثر شيوعاً هى مشكلة الجلبة الخارجية "outer race defect" والتى تقع فى منطقة الحمل "load zone"، ويليها مشكلة الجلبة الداخلية "inner race faults" أى أقل شيوعاً ومن النادر أن ترى مشاكل للعناصر المتدحرجة "ball spin frequency".

٤-٣- مكونات رولمان البللى

يتكون رولمان البللى من الأجزاء الآتية:-

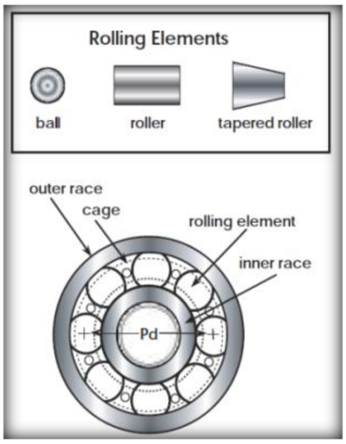
الجلبة (الحلقة) الخارجية "Outer Race"

الجلبة (الحلقة) الداخلية "Inner Race"

القفص أوالغويشة أو الشبكة "Cage"

العناصر المتدحرجة "Rolling Element" (الكور "ball"، الإسطوانة العدلة "roller" أوالإسطوانة المخروطية المدببة "tapered").

المسافة بين مركز عنصرين متدحرجين متعاكسين (PD) Pitch Diameter كما بالشكل.



٤-٤ الترددات القسرية لرولمان البللي "Forcing frequency"

عندما يدور البللى، ويحدث عدم إنتظام فى أسطح المجارى "raceway" أوعدم إستدارة العناصر المتدحرجة يثير ذلك الترددات الأساسية لرولمان البللى "fundamental defect frequencies" ويبدأ الإنهيار. وهناك أربعة ترددات لرولمان البللى تشمل أجزائه ومكوناته كما يلى:-

١- FTF وهى ترددات القفص "cage" "Fundamental Train Frequency".

٢- BSF وهى ترددات العناصر المتدحرجة "Ball Spin Frequency".

٣- BPFO وهى تردد الجلبة الخارجية "Ball Pass Frequency of the Outer race" وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الخارجية.

٤- BPFI وهو التردد الناتج من دوران العناصر المتدحرجة " Ball Pass Frequency of the Inner race" عندما يكون هناك خلل فى الجلبة الداخلية.

وجود أى من هذه الترددات الأربعة الأساسية لإنهيار رولمان البللى يؤدى إلى إستبدال رولمان البللى بواسطة فنى إصلاح متخصص والتأكد من أن يكون بيت البلية "housing fits" والجلبة الداخلية "shaft journals" لرولمان البللى فى الحدود المسموحة "within tolerance".

وأخيراً، فإن الأمر يحتاج إلى مناقشة وجود التفكك الميكانيكى "mechanical looseness"، والذى يتجلى فى صورة توافقات "harmonics" لسرعة الدوران (X١)، وهوالتفكك الناتج من قواعد الهياكل الخرسانية "Structural Looseness " أو قواعد رولمان البللى "bearing pedestal".

٤-٥- المراحل التسعة لتدهور أو إنهيار رولمان البللى "nine stages of bearing failures"

٤-٥-١- تقسيم بصمة الإهتزازات إلى أربعة مناطق

تعرفنا الآن على كيفية البحث على الترددات الأساسية "key frequencies" فى بصمة الإهتزازات، وننظر الآن إلى المراحل التسعة للتدهور التدريجى لرولمان البللى " Stages of Progressive Deterioration".

ملاحظة:- بعض الناس تذكر أربعة مراحل لتدهور أو إنهيار رولمان البللى "4 failure phases" ولكننا نأخذ هذا المراحل بمزيد من التفاصيل.

وتقسم بصمة الإهتزازات إلى أربعة مناطق "Zone" وهى (A،B،C،D) وكل منطقة محددة بمدى من التردد ويظهر فى كل منطقة الترددات الخاصة بمشاكل الماكينات.

المنطقة الأولى (Zone A)

وهى منطقة الترددات الخاصة بسرعة الدوران (X١) وتوافقاتها وغيرها من الترددات المتزامنة أو الغير متزامنة مع سرعة الدوران.

المنطقة الثانية (Zone B)

وهى منطقة ترددات إنهيار رولمان البللى "Bearing defect frequency" ويظهر فيها ترددات الجلبة الداخلية والخارجية والقفص والعناصر المتدحرجة لرولمان البللى وتوافقاتها والترددات التى تظهر على جانبيها والتى تسمى "sideband frequencies".

المنطقة الثالث (Zone C)

وهى منطقة التردد الطبيعى (fn) "natural frequency" لأجزاء رولمان البللى " Bearing component natural frequency" ويبدأ مداها من ٠,٥- 20 khz ويظهر فيها أيضاً الترددات الجانبية "sideband frequencies".

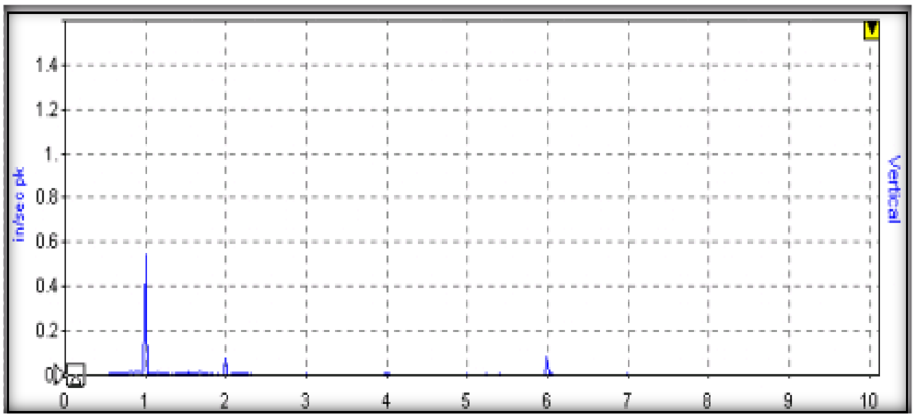
المنطقة الرابعة (Zone D)

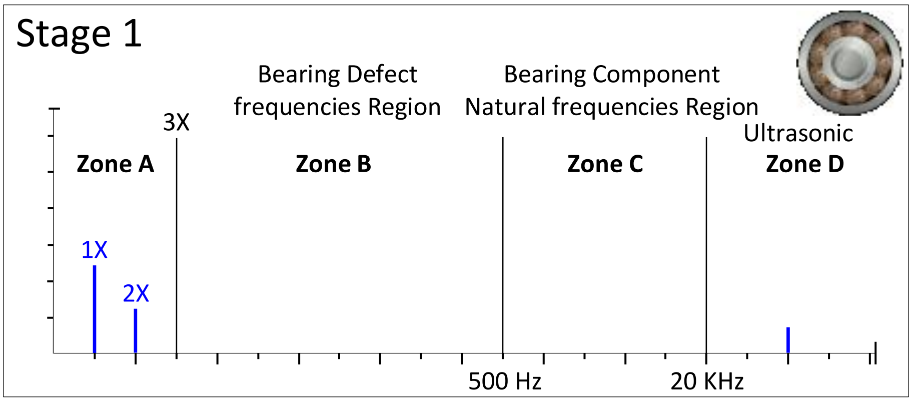
وهى منطقة ترددات الموجات الفوق صوتية "ultrasonic frequencies" أى منطقة الترددات العالية "high frequency" التى تتراوح مداها تقريبا "frequencies range" من ٢٠,٠٠٠ – ٦٠,٠٠٠ Hz أو 1,200,000-3,600,000 CPM وربما أعلى من ذلك. ويظهر بها المؤشرات المبكرة لمشاكل رولمان البللى. والقيمة الفعلية تعتمد على مكان القياس وسرعة الماكينة وتبدأ من ٠,٢٥ gSE إلى أكبر من ١٠٠ gSE وعندها يصبح التآكل ظاهراً "visible". وهناك عدد من الأجهزة الإلكترونية المصممة لقياس ترددات الموجات فوق الصوتية "ultrasonic frequencies"، وتشمل كل من (spike energy (gSE)، HFD(g)، shock pulse (dB)، SEE، وغيرها).

٤-٥-٢- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة الأولى

تظهر أولى المؤشرات المبكرة "earliest indications" لمشاكل رولمان البللى فى ترددات الموجات فوق الصوتية "ultrasonic frequencies" وفي هذه المرحلة تجد أن البصمة "vibration spectrum" "العادية" لن تعطيك أى معلومات.

مثال:- تظهر spike energy عند ٠,٢٥ gSE فى المرحلة الأولى والقيمة الفعلية تعتمد على مكان القياس وسرعة الماكينة إنظر المنطقة الرابعة.

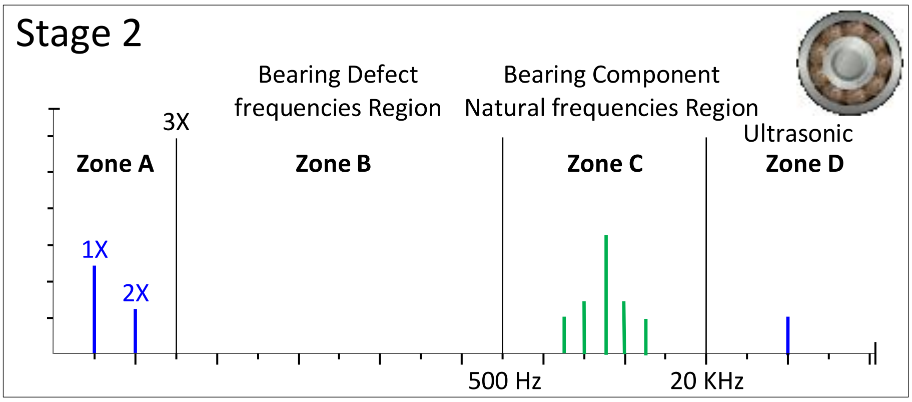




٤-٥-٣- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة الثانية

عيوب طفيفة تبدأ فى إثارة التردد الطبيعى (fn) لأجزاء رولمان البللى فيجعله يرن "ring" وكأنه جرس عند تردد الرنين "resonance frequency". ويحدث فى الغالب فى مدى تردد يبدأ من ٠,٥-20 khz ويعلو هذا التردد (التردد الطبيعى) كناقل أو حامل "carrier"، ويحاط على جانبيه بترددات إنهيار البللى "bearing defect" وتسمى "sideband" أو "modulating" إنظر إلى المنطقة الثالثة. ونلاحظ عدم ظهور أى ترددات خاصة بإنهيار رولمان البللى فى المنطقة الثانية.

مثال:- ترتفع spike energy من ٠,٢٥ gSE إلى ٠,٥٠ gSE فى المرحلة الثانية.

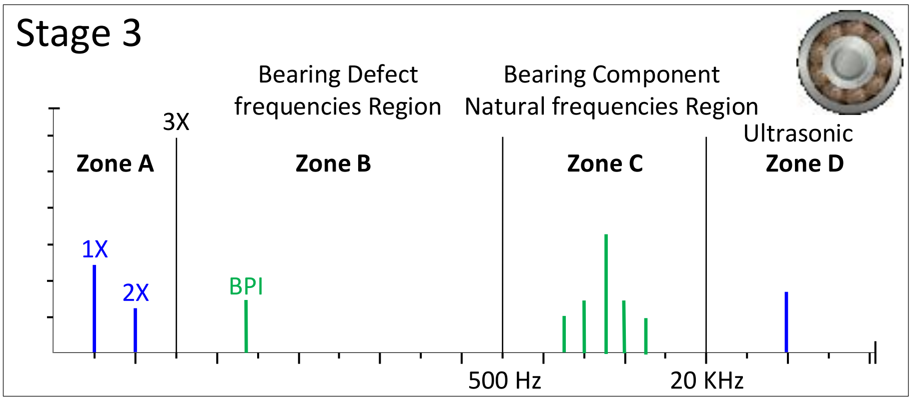


٤-٥-٤- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة الثالثة

فى هذه المرحلة يبدأ ظهور ترددات إنهيار رولمان البللى فقط وبدون "sideband" بالمنطقة الثانية. وإذا إفترضنا على سبيل المثال وجود مشكلة بالجلبة الداخلية "inner race" فإن هذا التردد يظهر "BPI" وكلما زاد التآكل فإن سعة هذا التردد تزداد ويزداد رولمان البللى سوءاً.

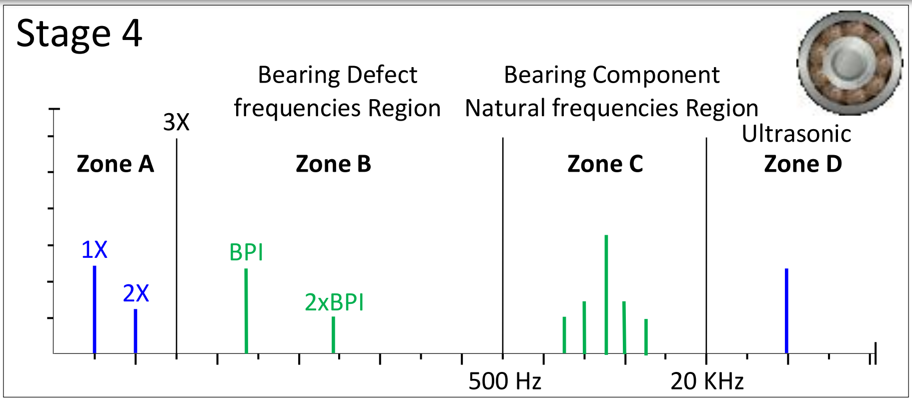
مع الأخذ فى الإعتبار وجود العديد من أشكال الإنهيار.

ويجب الأخذ فى الإعتبار أن مشاكل رولمان البللى ليست تأخذ دائماً نمط أو شكل كلاسيكى "classic pattern". قد تظهر علامات التآكل "signs of wear" وتختفى "come and go" - الإختبار الحالى من المكن أن يظهر وجود مشكلة والإختبار الذى يليه من الممكن أن يظهر لا شئ. يجب وضع ذلك فى الإعتبار عند مراقبة الماكينات التى بها رولمان البللى.

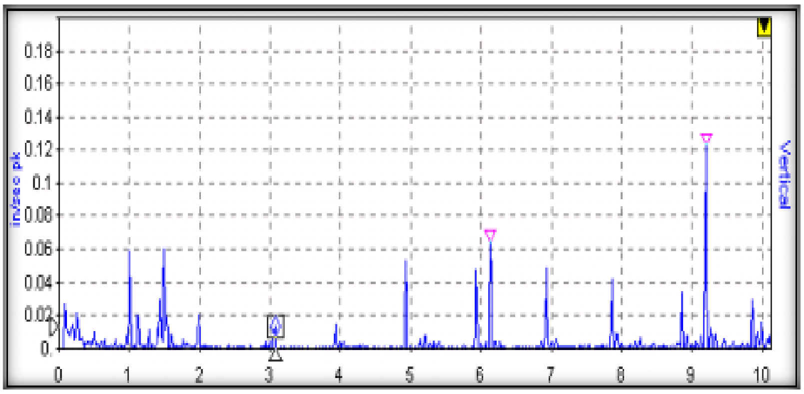


٤-٥-٥- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة الرابعة

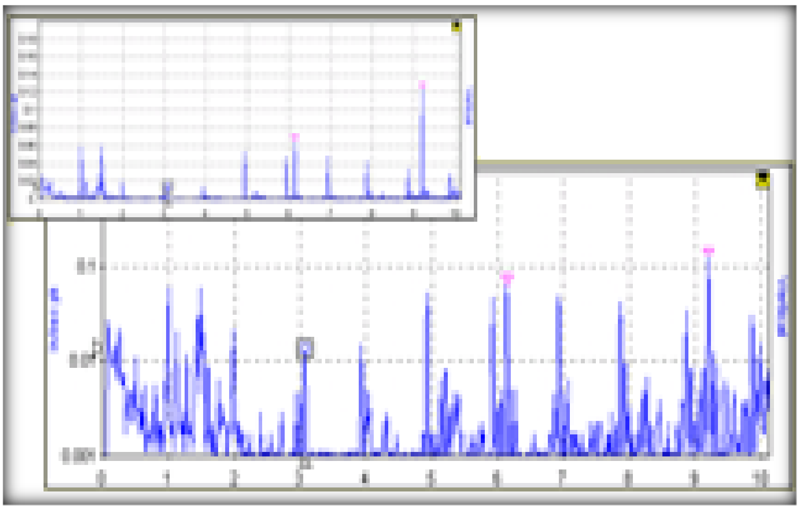
كلما تقدمت المشكلة "fault" وزاد التآكل فإن المشكلة سوف تتطور ويظهر توافقات "harmonic" لتردد الجلبة الداخلية "BPI" (وهذا على سبيل المثال). وهذا دليل يدل على زيادة كمية الصدمات "impacting".



هناك أوقات من الممكن أن تظهر التوافقات "harmonics" قبل الترددات الأساسية. لذلك كما هو متبع دائماً يجب البحث على قمم "peaks" لترددات غير متزامنة مع سرعة الدوران أو مضاعفاتها (X١) "non-synchronous"، ومعرفة أى توافقات.

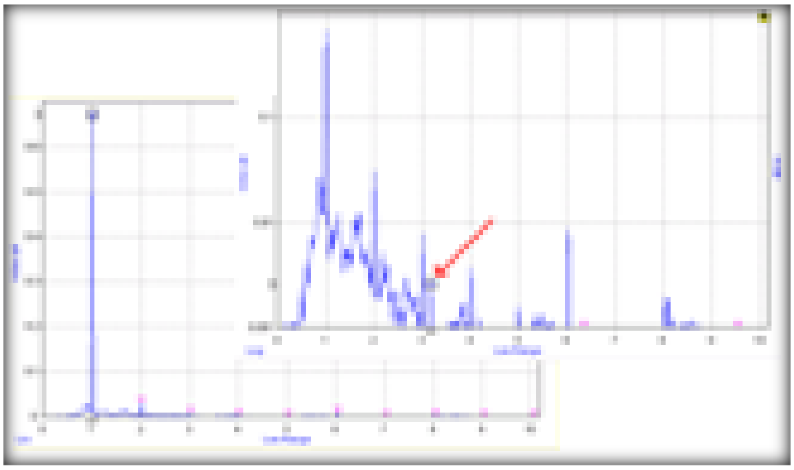


سعة الترددات الأساسية لإنهيار رولمان البللى "fault frequencies" سوف تبدأ بقيم منخفضة. وإذا عرضت هذه البيانات بمقياس رسم خطى "linear graph scale" فقط، ستفقد بسهولة هذه العلامات الحيوية "vital signs".

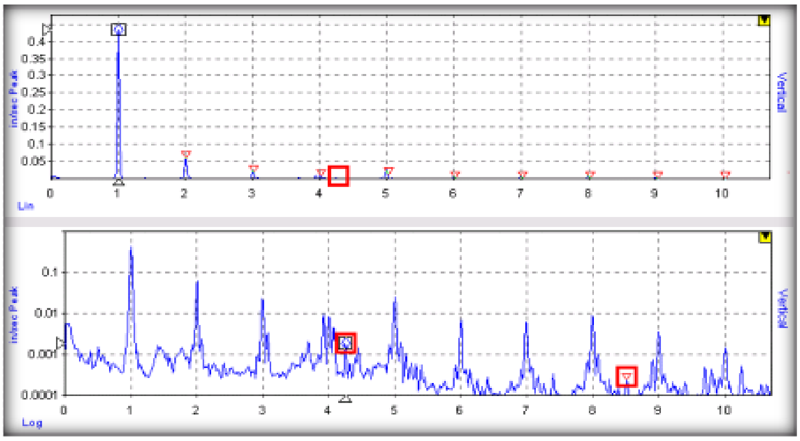


قد يقول البعض أنه لا داعى للقلق لأنها ليست سيئة بما فيه الكفاية إذا لم تتمكن من رؤية هذه العلامات الحيوية "vital signs" من خلال الرسم البيانى الخطى "linear graph". ونقترح بأنه إذا كنت ترغب فى التخطيط مبكراً والحصول على إنذار مبكر "early warning" للإنهيار المحتمل لرولمان البللى، عليك بإستخدام أدوات بسيطة مثل مقياس الرسم اللوغاريتمى "log graph scale" لرؤية كل شئ عن الماكينة.

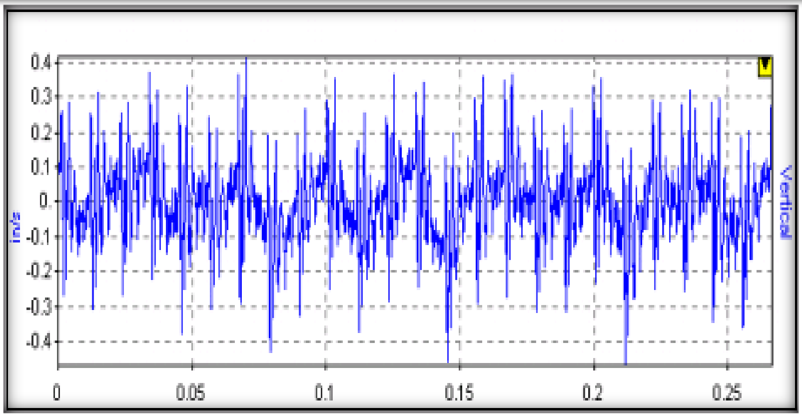
في هذا المثال:- نجد أننا لايمكنا رؤية أى شئ على الإطلاق من خلال الشكل الخطى " linear plot"، ولكن الشكل اللوغاريتمى "log plot" يظهر قمة "peak" عند ٣,١٨ X.



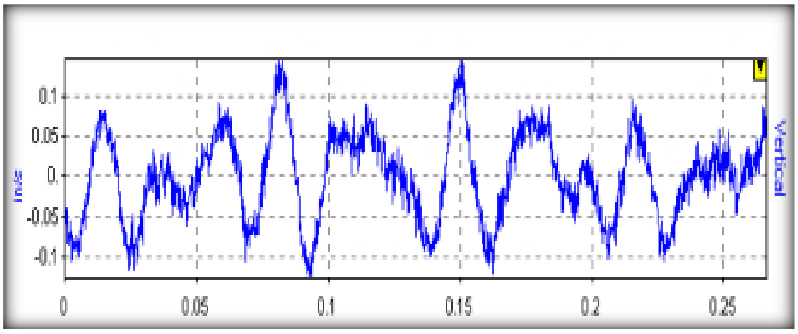
وهنا مثال آخر حيث نجد قمة "peak" وتوافقاتها لتردد غير متزامن مع سرعة الدوران أو مضاعفاتها (X١) "non-synchronous" ترى بالكاد "barely visible" من خلال الشكل الخطى "linear plot".



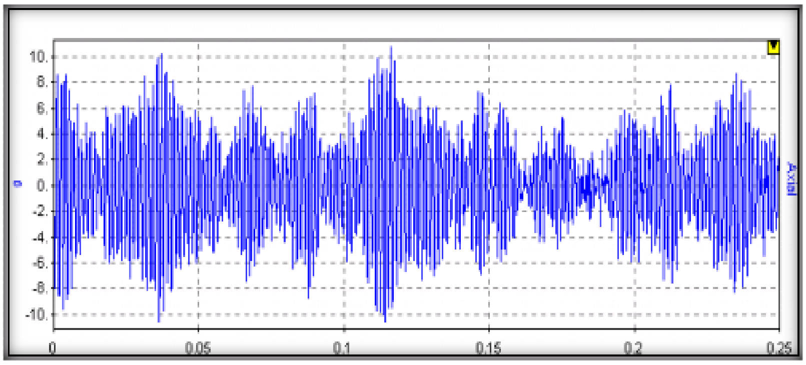
تحليل الشكل الموجى للإهتزازات "time waveform" مهم جداً فى هذه المرحلة. إذا توقعت أن ترى شيئاً فى بصمة الإهتزازات"spectrum" فإنك ستراها بالتأكيد فى الشكل الموجى. هذه الصدمات "impacts" سوف تظهر كما لو كانت نبضات "pulses" فى الشكل الموجى.



في هذا المثال يمكنك أن ترى الترددات العالية، ولكن ماتزال منخفضة السعة "low amplitude" والإرتفاعات (المسامير) "spikes" راكبة "superimposed" على الشكل الموجى "waveform" وسوف نفحص هذه البيانات فى الأمثلة القادمة "upcoming".

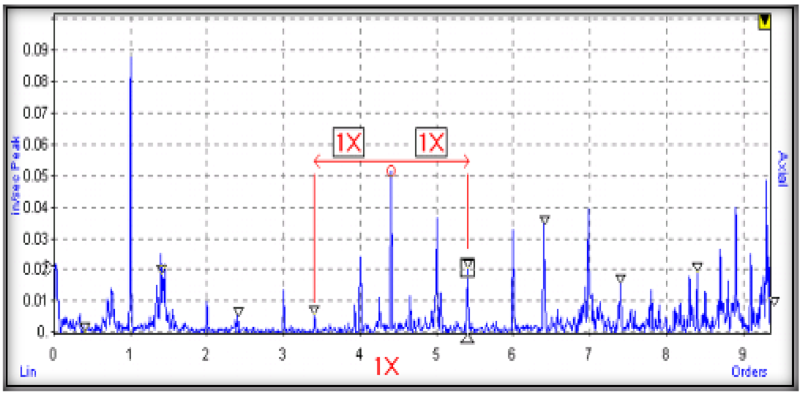


لابد من القول أنه إذا كنت تريد إكتشاف مبكر لمشاكل البللى، لابد من جمع بيانات التردد العالى "higher frequency" للموجة الجيبة "time waveform" بوحدات العجلة " units of acceleration" (بإستخدام لاقط الإهتزازات "accelerometer") – معنى ذلك لايوجد تكامل "integrate". العجلة تبرز محتويات "content" التردد العالى، والذى يعتبر مثالياً لهذا النوع من التطبيقات.



٤-٥-٦- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة الخامسة

عندما يزداد التآكل فإن الأضرار تزداد تفاقماً ويزداد مستوى الإهتزازات للجلبة الداخلية "BPI" وتظهر التوافقات بشكل أكثر مصحوبة بترددات على جانبيها والمعروفة "sidebands"، ويعتمد ذلك على طبيعة العطل "nature of the fault".



ونتذكر أن "modulation" يحدث عندما تتغير سعة إحدى الترددات بصفة دورية (تردد إنهيار البللى). وهناك نوعان من الحالات التى يمكن أن يحدث فيها "modulation" (فى الماكينات الإفقية).

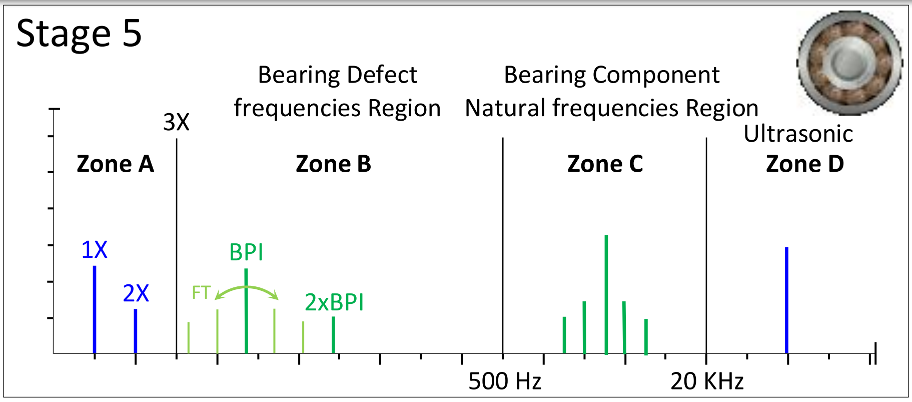
في الحالة الأولى، إذا حدث مشكلة فى الجلبة الداخلية لرولمان البللى "inner race"، ستكون الصدمات "impacts" أكثر عنفاً "more violent" وتتولد أعلى سعة وذلك عندما تكون الجلبة الداخلية لرولمان البللى فى منطقة الحمل "load zone".

"load zone"، تتضعف الصدمات

وتتناقص السعة وتصل إلى أقل ما يمكن "minimum" عندما تكون على قمة البللى.

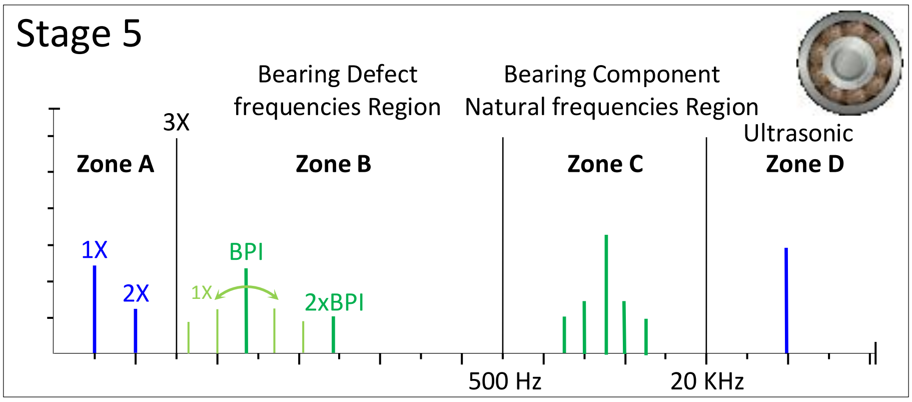


لذلك، فى هذه الحالة نجد أن تردد إنهيار الجلبة الداخلية "modulated" بتردد سرعة الدوران (X١) (سرعة دوران الجلبة الداخلية)، ولذلك نتوقع "sidebands" من (X١) (أى تردد الجلبة الداخلية محاطة على جانبيها بسرعة الدوران). وسوف نرى أمثلة على ذلك مستقبلاً.



وفى حالة وجود مشكلة بالعناصر المتحركة (الكور/البلح)، سوف نجد أيضاً "modulated" لنفس السبب. عندما تكون الكرة فى منطقة الحمل، ستكون الصدمات أكثر عنفاً عنها عندما تكون خارج منطقة الحمل. وتزداد سعة الإهتزازات كلما إقتربت الكرة إلى منطقة الحمل.

ولكن كيف تتحرك الكرة بسرعة داخل وخارج منطقة الحمل؟ ليس بسرعة الدورات (X١)، الكرة تتحرك حول البللية عند تردد القفص (الشبكة) "FTF". هذا التردد أقل بكثير من (X١) ويساوى عادةً حوالي ٠,٤X.



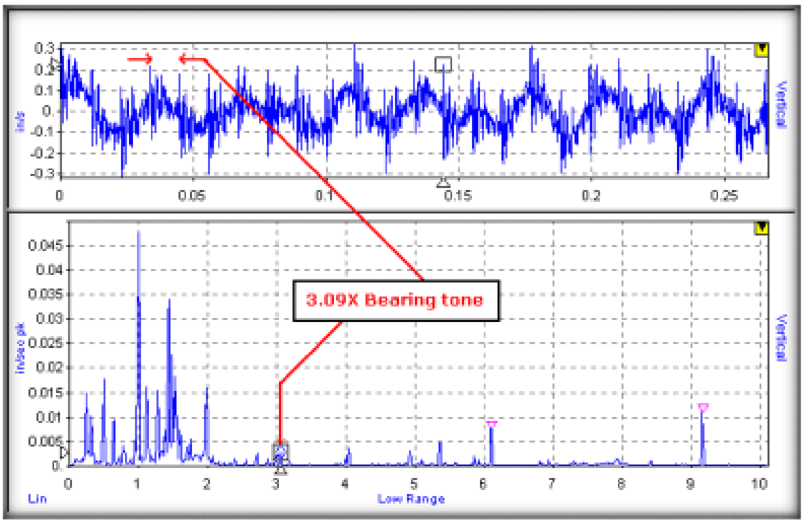
إذا بدأت فى رؤية التوافقات، وخصوصاً "sideband" التى تكون مرافقة لإحدى توافقات تردد إنهيار البللى، فى هذا الحالة سيصبح التآكل ظاهراً "visible" وفى هذه الحالة يتم الإسراع فى إستبدال رولمان البللى.



لاحظ أيضاً فى هذه المرحلة، أن قياسات الترددات العالية لرولمان البللى "high frequency" وهى الموجات فوق الصوتية مثل "shock pulse-spike energy" تستمر فى الإرتفاع.

وشكل الموجة الجيبية "time waveform" سوف تظهر مرة أخرى تأثير الإنهيار الذى لحق برولمان البللى. والمسامير "spikes" الموجودة فى الشكل الموجى تكون أكثر وضوحاً

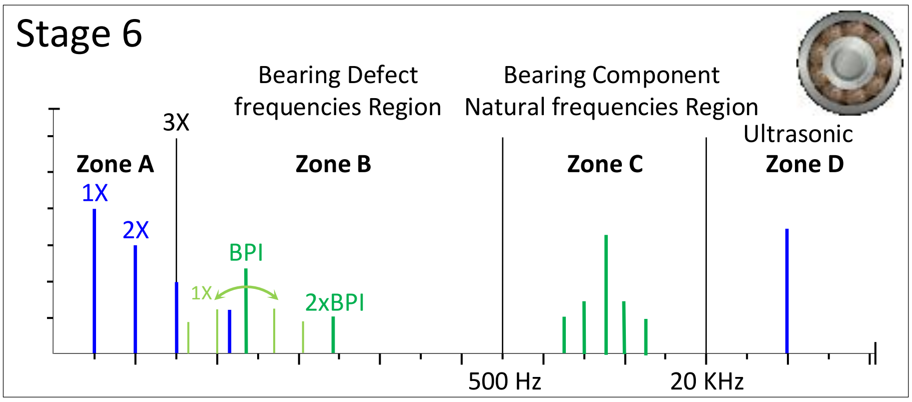
"pronounced"، وسوف تكون قادر على قياس الزمن بين كل مسمار لحساب التردد المعيب "defect frequency".



٤–٥–٧- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة السادسة

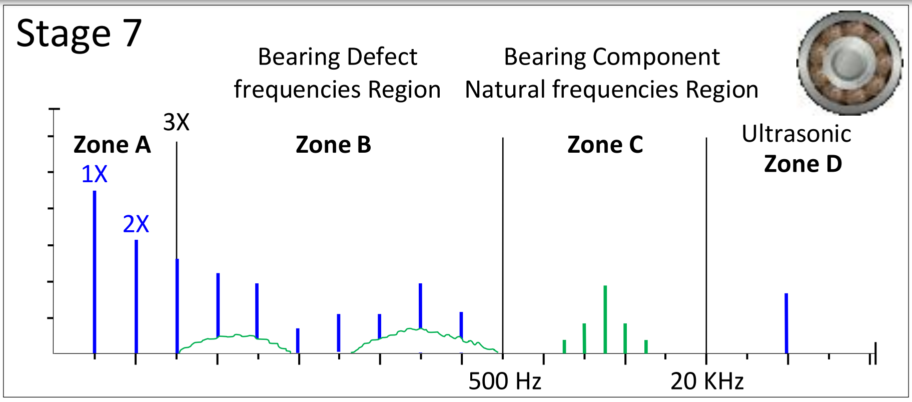
سعة سرعة الدوران (X١) تنمو وتزداد، ويظهر العديد من توافقات سرعة الدوران إنظر إلى المنطقة الثانية، ووجود "sideband" حول إحدى توافقات تردد إنهيار البللي. ويرجع السبب فى ذلك إلى زيادة خلوصات "clearance" رولمان البللي نتيجة لزيادة التآكل "wear".

و spike energy تستمر فى الإرتفاع وتصل على سبيل المثال إلى ١ gSE.



٤–٥–٨- إنهيار رولمان البللي:- المرحلة السابعة

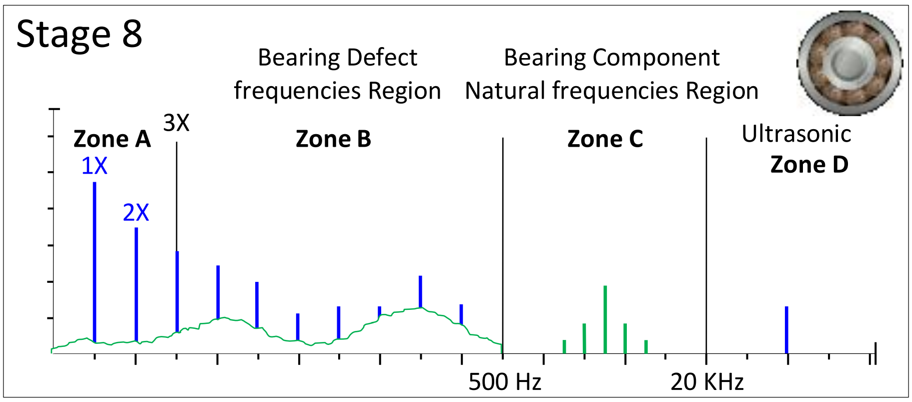
الآن نرى إستبدال ترددات إنهيار رولمان البللي و "sidebands" بمطبات أو حدبات "humps" فى بصمة الإهتزازات، وغالباً ما يشار إليها بما يسمى أكوام التبن "haystacks". ويرجع ذلك إلى وجود نطاق عريض من الضوضاء "broadband noise". وفى هذه الحالة قد تكون قادراً على سماع الضوضاء بالوقوف بجوار الماكينة.



في هذه المرحلة يبدأ إنخفاض التردد الطبيعى لرولمان البللى إنظر إلى المنطقة الثالثة ويبدأ أيضاً الإنخفاض التدريجى لقياسات الموجات فوق الصوتية إنظر إلى المنطقة الرابعة. وإذا كنت تستخدم هذه الأجهزة الإلكترونية المصممة لقياس ترددات الموجات فوق الصوتية وبدأت ترى الهبوط التدريجى فإنه فى هذه الحالة يتم الإسراع فى إستبدال رولمان البللى.

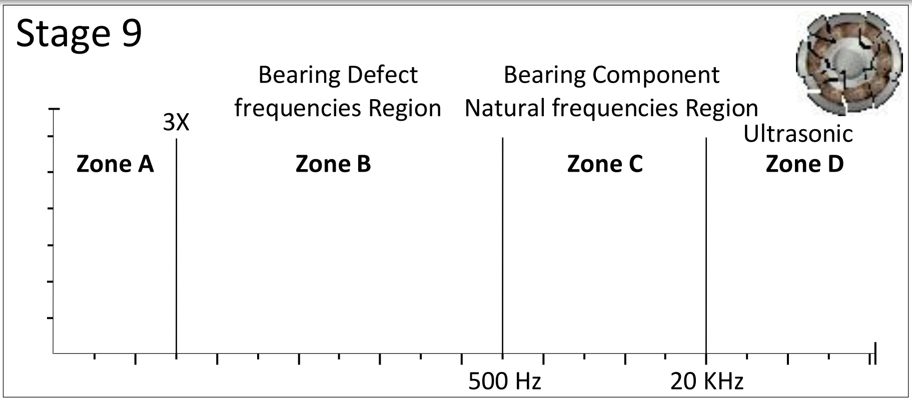
٤-٥-٩- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة الثامنة

تزداد الأمور تعقيداً، وكومة التبن تنمو وتكبر "haystacks"، والتوافقات "harmonics" لسرعة الدوران (1X) تنمو وتزداد مع زيادة فى التفكك "looseness" نتيجة زيادة التآكل، ويستمر الإنخفاض التدريجى للموجات فوق الصوتية "ultrasonic"، والأهم من ذلك تبدأ الضوضاء فى الإرتفاع "noise floor". وسوف تكون قادراً بالتأكيد على سماع الضوضاء الصادرة من البللى. واعلم بأن الوقت قد ينفذ "running out".



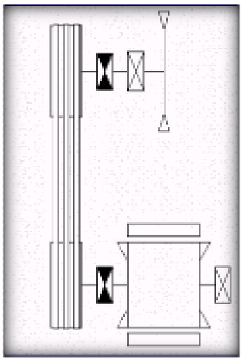
٤-٥-١٠- إنهيار رولمان البللى:- المرحلة التاسعة

بصمة الإهتزازات "spectrum" أصبحت مسطحة جداً ولا تحتوى على أى بيانات (تحذير) وهى إما الماكينة لا تعمل أو حدث إنهيار كامل لرولمان البللى.

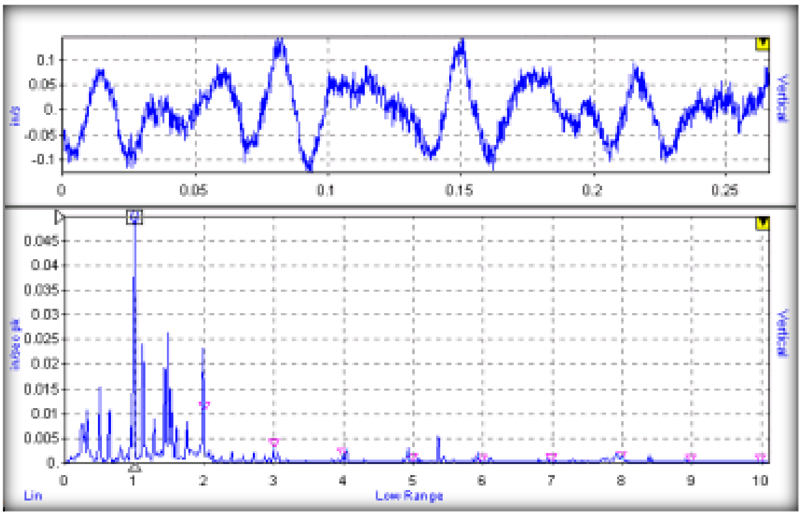


٤-٦- أمثلة

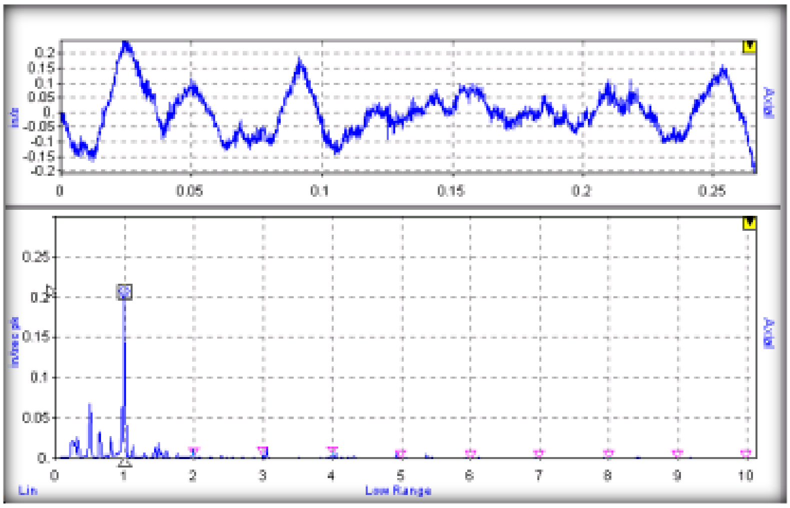
هذه الماكينة تحتوى على موتور ٢٩,٨ كيلوواط (٤٠ حصان) يقود مروحة بها ١٦ ريشة من خلال سيور للنقل الحركة بنسبة تخفيض ٢:١.



على سبيل المثال سوف ننظر إلى سلسلة من القياسات التى تمت خلال تسعة أشهر.

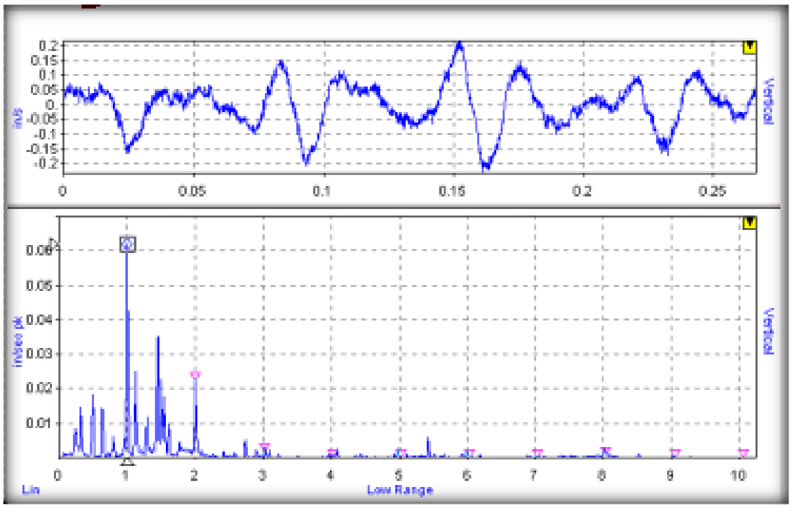


عندما بدأت القياسات ٩٩/٥/٤، القياسات فى المستوى الرأسى والأفقى لا تظهر شئ على الإطلاق والسعة مستوياتها منخفضة "quite low". والشكل الموجى لا يظهر بعض الترددات العالية مما يدل على أن العلامات المبكرة لتآكل رولمان البللى غير موجودة. ولكننا ممكن أن نجد ترددات مرتبطة بالسيور وعمود الدوران.



يمكننا أن نرى الإهتزازات فى الإتجاه المحورى "axial vibration" ذروة "peak" X١ عالية، مما يوحى بوجود عدم سنترة الطنبورة "sheaves" – والتي قد تكون سبب مشكلة رولمان البللى.

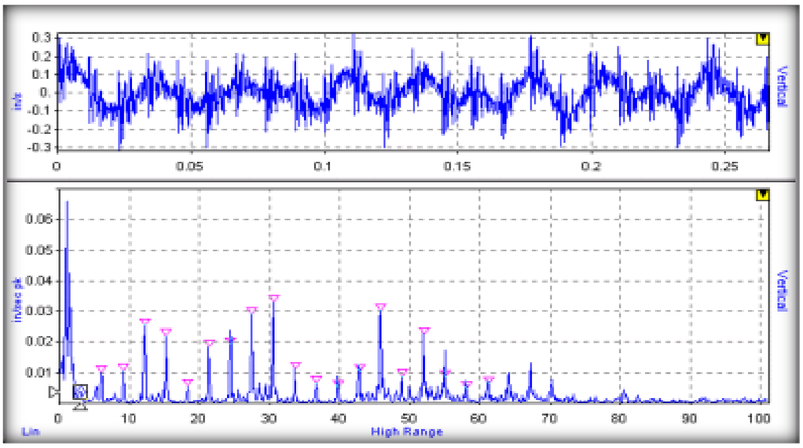
في الشهر التالي بدأ مستوى الإهتزازات فى التزايد. وبدأت موجة الإهتزازات تظهر المزيد من علامات تآكل رولمان البللى. ومن الصعب أن ترى ذلك فى الشكل الخطى "linear plot" ولكن فى الشكل اللوغاريتمى "log view" من الممكن أن ترى ذروة عند X٣,١ وتوافقاتها "harmonics". ومن الممكن القول بأن تلك هى المرحلة الرابعة من إنهيار رولمان البللى.



إذا قفزنا إلى تاريخ ٩٩/١/٦، علامات تآكل رولمان البللى أصبحت قوية جداً. وأصبحت الموجة الجيبية تقليدية. ممكن أن ترى الصدمات تحدث كل X٣,١ من سرعة الدوران.

لدينا مجموعتين من بصمة الإهتزازات على الماكينة أحدهما بمدى تردد منخفض X١٠ " low range" والأخرى بمدى عالى من التردد X١٠٠ "high range".

وإذا نظرت إلى بصمة التردد المنخفض فإنك سوف ترى أن X٣,١ وتوافقاتها قوية جداً " very strong".

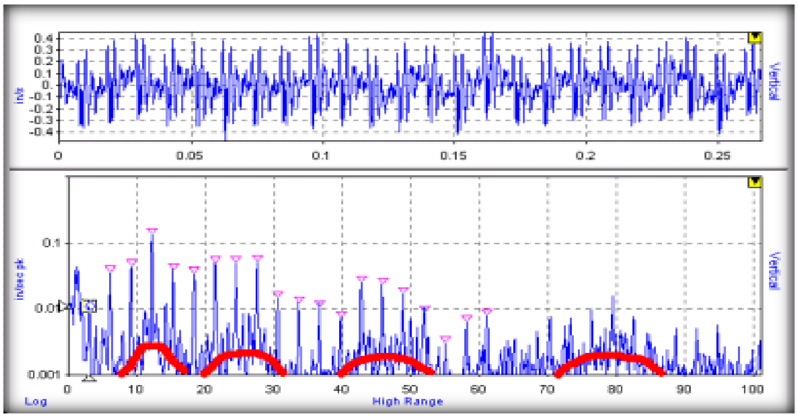


إذا دققت النظر، حتى بإستخدام المقياس اللوغاريتمى "log"، فإنك لن تجد ترددات جانبية قوية "sidebands"، ولكن كيف يحدث ذلك؟ لقد ناقشنا فى وقت سابق أن تلك الترددات الجانبية تحدث إذا وجدت مشكلة فى العناصر المتحركة "ball fault" (sidebands من FTF وهى ترددات القفص "cage") أو مشكلة بالجلبة الداخلية "BPI" (sidebands من X١).

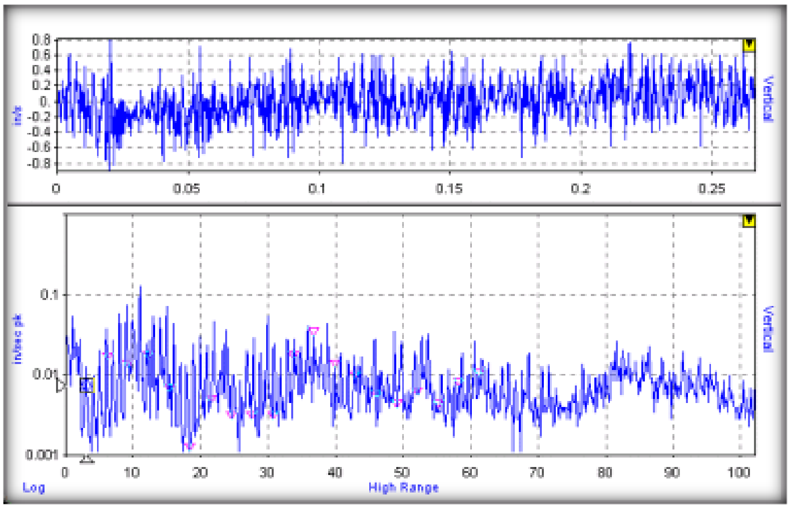
ونظراً لأن نغمة رولمان البللى "bearing tone" منخفضة التردد (BPI=٠,٦ X # كرات، BPO = ٠,٦ X # كرات) ولذلك نفترض أن المشكلة فى الجلبة الخارجية "outer race". ونحصل على توافقات وليس "sidebands".

لاحظ أننا كنا قادرين مع بعض الثقة على تحديد طبيعة المشكلة حتى بدون معرفة نوع رولمان البللى الذى بالماكينة.

بمرورالوقت تزداد مستوى التوافقات ويظهر أكوام التبن "haystacks" وكذلك إرتفاع مستوى الضوضاء "noise floor" ويرجع السبب فى ذلك إلى زيادة خلوصات "clearance" رولمان البللى نتيجة لزيادة التآكل "wear"، هذه البيانات من قياسات الترددات العالية (تاريخ ٩٩/٥/١٠). إنظر إلى بيانات الموجة الجيبية.

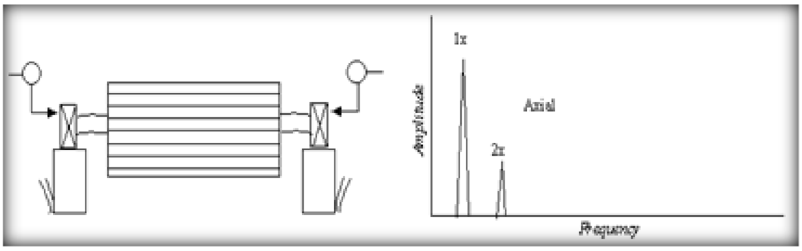


والآن نلقى نظرة على القياسات التى تمت بتاريخ ٠٠/١٢/١. إنها تبدو مختلفة جداً، الشكل الموجى لا يحتوى على نفس الإرتفاعات الدورية "periodic spikes"، وبصمة الإهتزازات لا تحتوى على توافقات، ولكن مستوى الضوضاء فى إرتفاع مستمر "noise floor". ونحن الآن فى المرحلة الثامنة. غالباً تم إنهيار البللى، وسوف تنهار الماكينة "catastrophically" بعد يومين فقط.



القسم الثانى:- تشخيص المشاكل الأخرى للماكينات الدوارة

١- إنحناء الأعمدة "bent shaft"



١- إنحناء الأعمدة يسبب إهتزاز عالى فى الإتجاه المحورى "high axial vibration".

٢- إذا كان الإنحناء قريب من وسط العمود "shaft center" فإن X١ تكون مهيمنة "dominant".

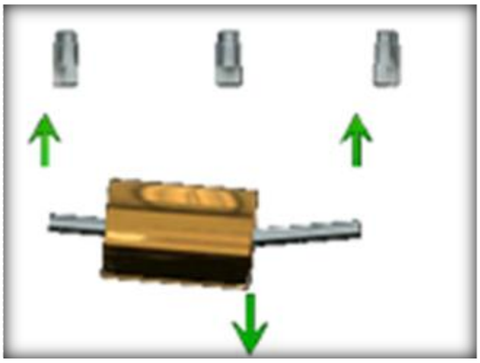
٣- أما إذا كان الإنحناء قريب من نهاية العمود "shaft ends" أى قريب من الكوبلنج فإن X٢ تكون مهيمنة "dominant".

٤- فرق زاوية الطور فى الإتجاه المحورى "axial phase differences" سوف تميل إلى ١٨٠ درجة على طرفى الماكينة.

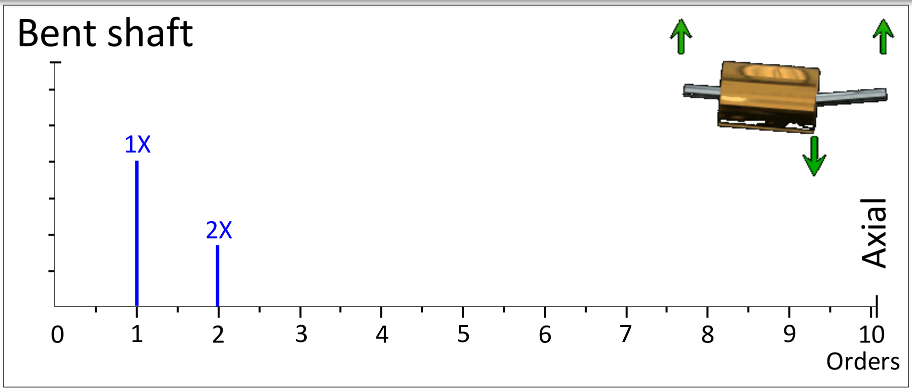
ملحوظة:- كن حذراً فى مراعاة إتجاه لاقط الإهتزاز لكل قياس فى الإتجاه المحورى " axial measurement" إذا عكست إتجاه المجس.

١-١- تشخيص إنحناء العمود

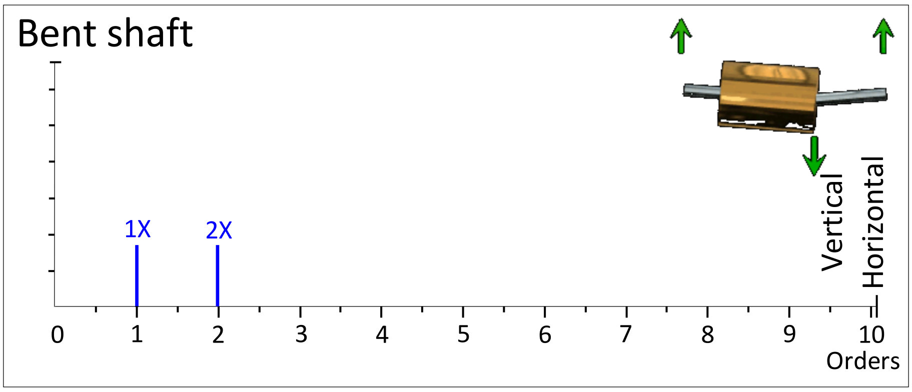
من المهم معرفة كيفية تشخيص إنحناء الأعمدة للماكينات لأنه غالباً ما يحدث خلط بينه وبين عدم السنترة وعدم الإتزان.



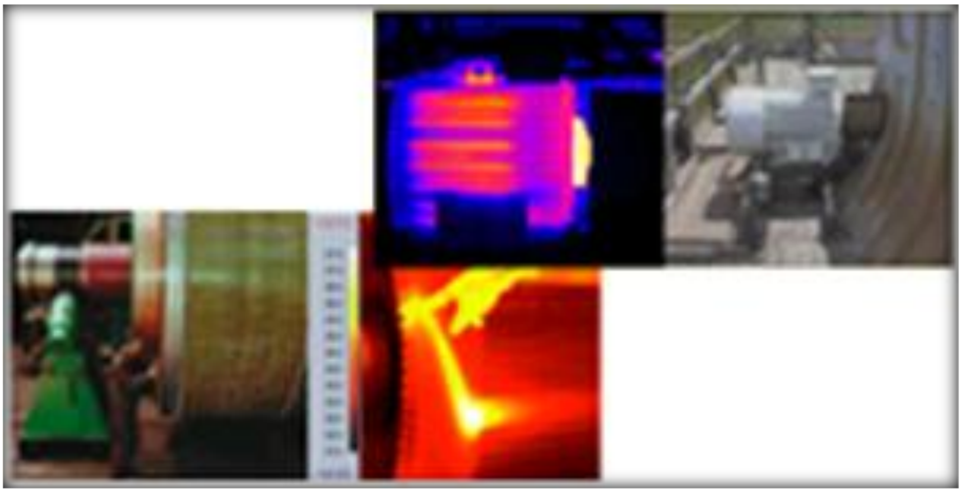
وإنحناء العمود يسبب فى الغالب إهتزازات عالية فى الإتجاه المحورى عند X١. والتردد المهيمن يكون عادةً عند X١ إذا كان الإنحناء قريباً من منتصف العمود، وسترى إهتزازات عند X٢ إذا كان الإنحناء قريباً من الكوبلنج.



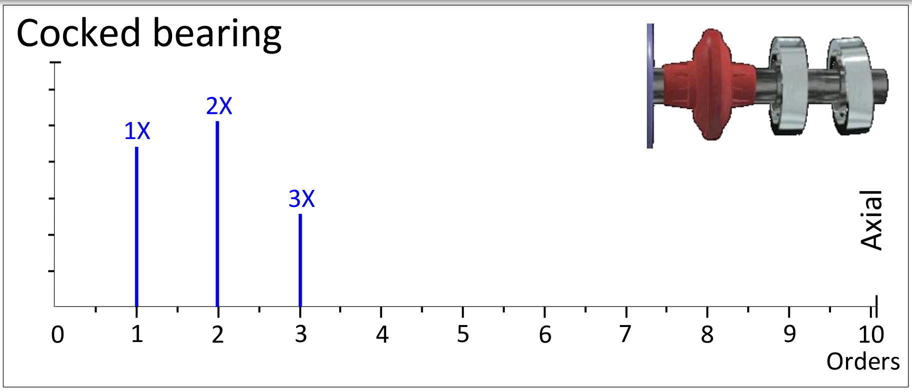
قياسات المحور الرأسى والإفقى سوف تظهر قمم عند X١ و X٢ ولكن قياسات الإتجاه المحورى هى العامل الرئيسى.



ومن الشائع أن يتسبب إنحناء العمود فى عدم تساوى الحرارة على الروتور، نتيجة لسوء بارات الروتور. وإذا كان الإنحناء دائم، يمكن عمل إتزان لعودة الإهتزازات لوضعها الطبيعى.



بالنظر إلى قوة الإهتزازات فى الإتجاه المحورى، ومن الممكن الخلط بينها وبين عدم سنترة الكوبلنج، وأيضاً مع عدم الإتزان فى حالة الطلمبات والمراوح المتدلية "overhung". ووجود قمم عند X٢ و X٣ تشير إلى مشكلة "Cocked bearing" بالإضافة إلى عدم الإتزان.



١-٢- علاقات الطور فى حالة إنحناء الأعمدة

زاوية الطور إختبار جيد يستخدم لتشخيص إنحناء العمود. زاوية الطورعند X١ فى الإتجاه المحورى على طرفى الماكينة يكون ١٨٠ درجة عكس الإتجاه "out of phase".

من الممكن أيضاً أخذ قراءات الطور حول العمود – على جانبى العمود، وفى أعلى وأسفل كما هو مبين فى الشكل. ونتوقع أن تكون جميع القراءات فى نفس الإتجاه "in-phase".



٢- تحليل إهتزازات صندوق التروس "Gearbox analysis"

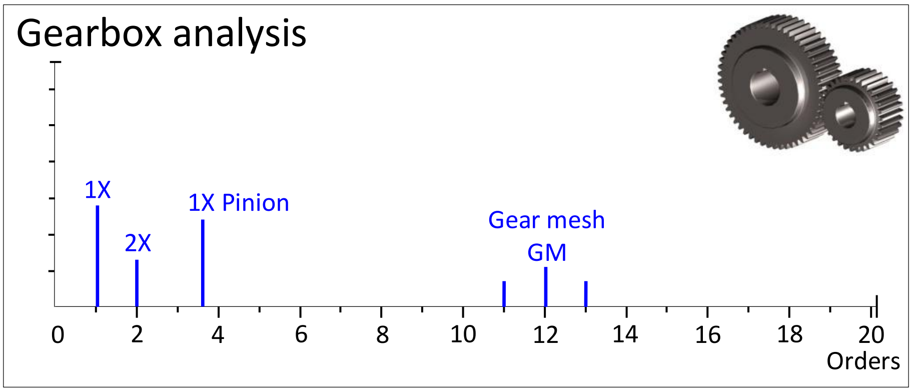
٢-١- البصمة "Spectrum" والشكل الموجى "Time waveform" للتروس

عندما ناقشنا الترددات القسرية "forcing frequencies" ودرسنا صندوق التروس فى بعض التفاصيل. وجدنا أن هناك ثلاث ترددات رئيسية وهى السرعة الداخلة "input speed" وتردد تعشيق التروس "gearmesh" (عدد الأسنان مضروبة فى سرعة دوران العمود) وسرعة الخروج "output speed".

Gear mesh = Number of teeth x Shaft speed
Output speed = Input speed x Input teeth/Output teeth

عندما يحتوى صندوق التروس على مرحلتين أو أكثر "stages" (أو تعشيق الأسنان يكون محكم ودقيق "precise")، حساب التردد القسرى يصبح أكثر صعوبة (لوجود سرعات متعددة وكذلك العديد من ترددات تعشيق التروس)، وهكذا يكون من الصعب ربط زيادة مستوى الإهتزازات مع عيوب معينة.

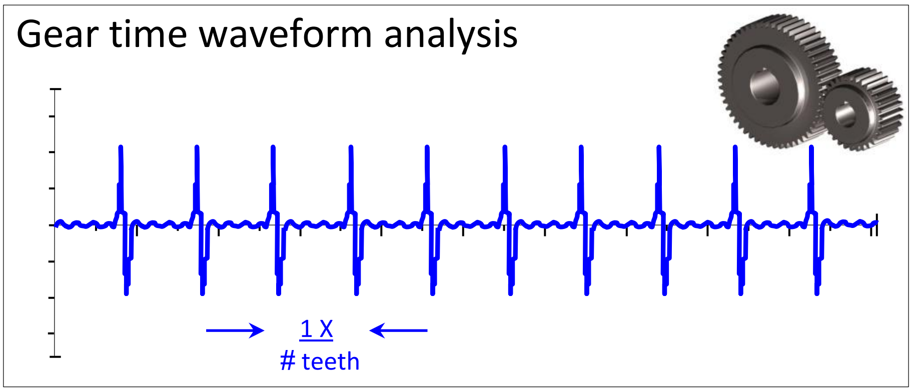
ستجد عادةً قمم "peaks" عند سرعة دوران الأعمدة "shaft speeds" وتردد تعشيق التروس "gear mesh frequency" إلا إنها ستكون مستواها منخفض "low level". من الممكن ظهور قمة عند X٢، وربما يكون هناك ترددات جانبية "sidebands" من سرعة دوران العمود حول تردد تعشيق التروس.



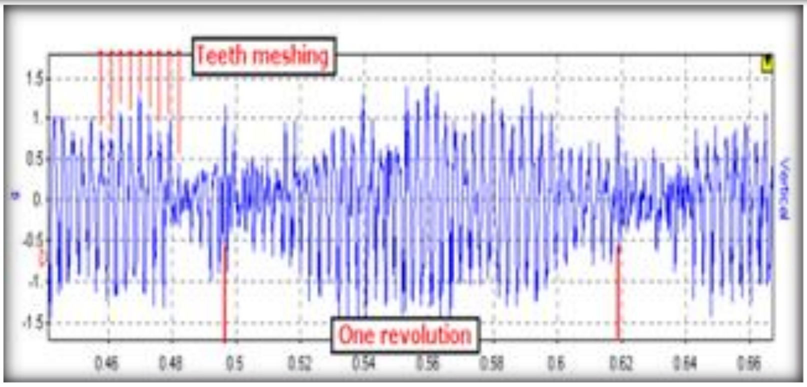
وسوف تكون هذه الترددات هى الأشهر فى الإتجاه الراديال "radial direction" للتروس العدلة "spur gears" وفى الإتجاه المحورى "axial direction" للتروس الحلزونية "helical gears".

الشكل الموجى للتروس

تحليل الإشارة الموجية هى أداة قوية عندما يتعلق الأمر بتحليل قياسات صندوق التروس. عند كل تعشيق للتروس سوف تجد نبضة "pulse" فى الشكل الموجى "waveform". يمكنك دراسة الشكل الموجى وحساب عدد الإسنان "teeth". وإعتماداً على طبيعة المشكلة "fault" من الممكن رؤية الصدمات/النبضات "impacts/pulses" لكل سيكل عند السعات العالية "higher amplitude"، أو السعات المنخفضة "lower amplitude" (إذا كانت الحالة منتهية).



في هذا المثال يمكننا أن نرى بوضوح النبضات "pulses" (التروس بها عدم محاذاة " out of alignment"). كل نبضة ترجع إلى تلامس بين إثنين من التروس. يمكننا أيضاً أن نرى السيكل المرتبطة بلفة كاملة لعمود الدوران "complete revolution".



يستخدم متوسط الوقت المتزامن "Time synchronous averaging" (TSA) عادةً عند محاولة تشخيص أعطال التروس. TSA سوف تقوم بإبعاد المتوسط بعيداً عن مصادر الاهتزازات التي ليست متزامنة "not synchronous" مع النبضات الصادرة من جهاز التاكو "tach pulse" التي تؤخذ من عمود الترس المطلوب.



ومعنى ذلك أن المصادر الأخرى للإهتزازات من كل من رولمان البللى والموتور والرنين وهلم جرا يتم إزالتها ويصبح الشكل الموجى نظيف "time waveform". TSA يستغرق وقتاً طويلاً (حيث يلزم عدد كبير من المتوسطات) حيث يأخذ وقت عندما يتم إعدادة أول مرة ولكن النتائج تستحق هذا الجهد.

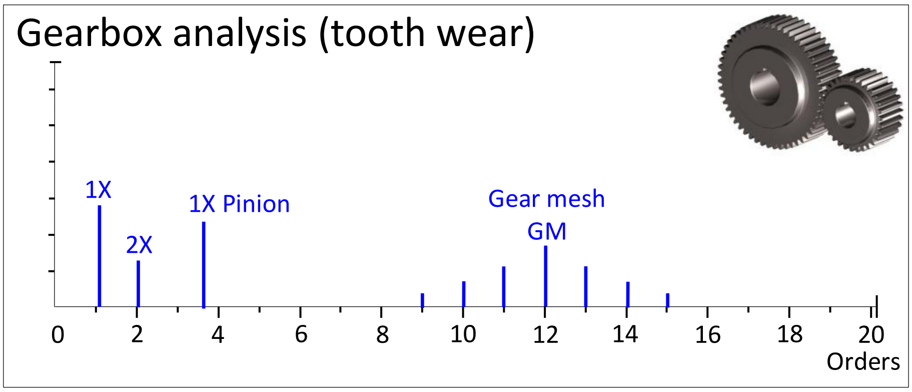
٢-٢ مشاكل صندوق التروس "Gearbox problems"

٢-٢-١ الكشف عن تآكل الأسنان "Detecting tooth wear"

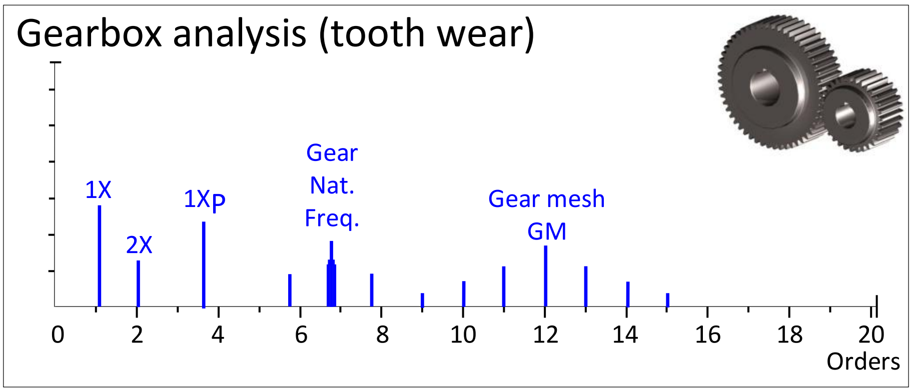
تآكل التروس "Gear Wear" ينتج عنها سعة عالية "high amplitudes" عند تردد تعشيق التروس وتوافقاتة "harmonics". أيضاً، الإحتكاك/التآكل "rubbing/wearing" يثير التردد الطبيعى "natural frequency" للترس (أو التروس). وهذا من الممكن أن يظهر ترددات غير مبررة "unexplained frequencies" – وإنها قد تكون تردد الرنين للتروس.

هناك مؤشرين رئيسيين لظهور تردد الرنين للتروس "resonant frequency" وهما الترددات الجانبية "sidebands" وحجم وعدد الترددات الجانبية حول (١,٢ أو ٣ x GMF) – لاحظ أن سعة تردد تعشيق التروس "GMF" والتوافقات وحدها هى أفضل مؤشر للحمل "load" والسنترة "alignment".

عندما تبدأ الأسنان فى التآكل سيحدث أمرين. الأول زيادة مستوى الإهتزازات للترددات الجانبية "sidebands" حول تعشيق التروس "gear mesh". الترددات الجانبية تتوافق مع سرعة الترس الذى به التآكل.



الأمر الثانى هو أن التردد الطبيعى "natural frequency" للترس يحدث له إثارة "excited" ومن المحتمل أن يكون له قاعدة عريضة "broader base". وهذه القمة "peak" يظهر حولها أيضاً ترددات جانبية "sidebands".



<u>أعراض تآكل الأسنان "Gear Wear Symptoms"</u>

١- سعة عالية عند تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢ أو٣ GMF).

٢- ترددات جانبية بسعة عالية حول تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF) عند سرعة الدوران (rpm x١) للترس الذى به مشكلة "worn gear".

٣- قمة بسعة عالية "Amplitude peak" عند تردد الرنين "resonant frequency" للترس (التروس).

٤- ترددات جانبية عند (rpm x١) حول تردد الرنين للترس الذى به مشكلة "worn gear" حول تردد الرنين.

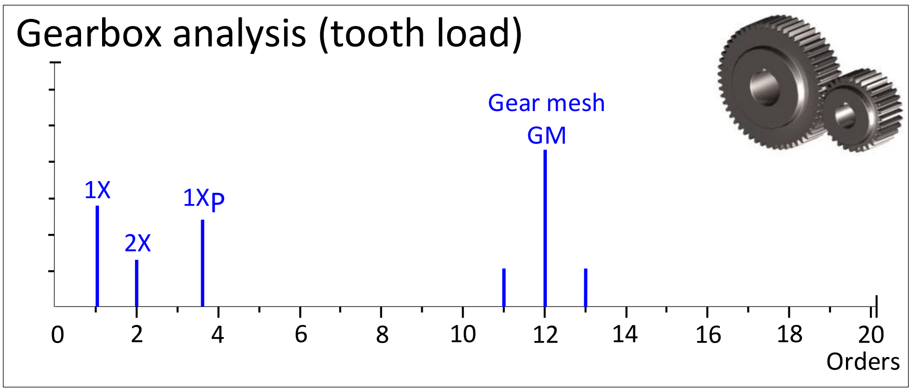
<u>توصيات الأعمال "Recommended Actions"</u>

١- فحص التروس "Inspect gears" لمعرفة شكل التآكل "wear pattern" والتحقق من مناسبة عمق التعشيق "proper mesh depth".

٢- فحص التروس "Inspect gears" للتحقق من مناسبة البكلاش "proper backlash".

٢-٢-٢ الحمل على الأسنان "Tooth load"

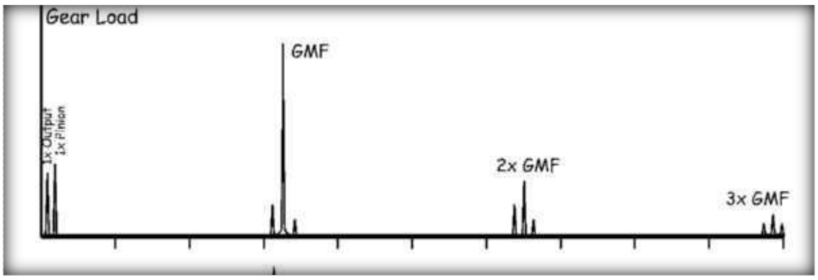
مستوى الإهتزازات لتعشيق التروس "tooth mesh frequency" يعتمد على سنترة "alignment" العمود الحامل للترس "carrying the gears" وكذلك الحمل على التروس "load on the gear". ووجود قمة عالية "high peak" لتردد تعشيق التروس لا يشير بالضرورة إلى مشكلة.



أو بمعنى آخر الحمل على الأسنان "Tooth load" يؤثر فى كثير من الأحيان على تردد تعشيق التروس "GMF" وتوافقاتها أكثرمن تأثيرها على الترددات الجانبية "sidebands" لسرعة الدوران والتى تكون منخفضة السعة وعددها قليل نسبياً.

الزيادة والنقصان فى سعة تعشيق التروس "GMF" وتوافقاتها فقط (بدون تغير كبير فى الترددات الجانبية) لا تشير بالضرورة إلى وجود مشكلة. حتى إذا كان الحمل نفسه ثابت إلى حد ما، الترس الذى يحمل الحمل فى تغير مستمر وهذه السعة يمكن أن تتغير من قياس إلى آخر دون أى تدهور لحالة الترس على الإطلاق.

ويمكن أن يحدث تغير فى الحمل نفسه ويكون له تأثير أكثر وواضح على السعة فى بصمة الإهتزازات دون أن يعكس عن وجود أى مشكلة.



أعراض الحمل على الأسنان "Gear Load Symptoms"

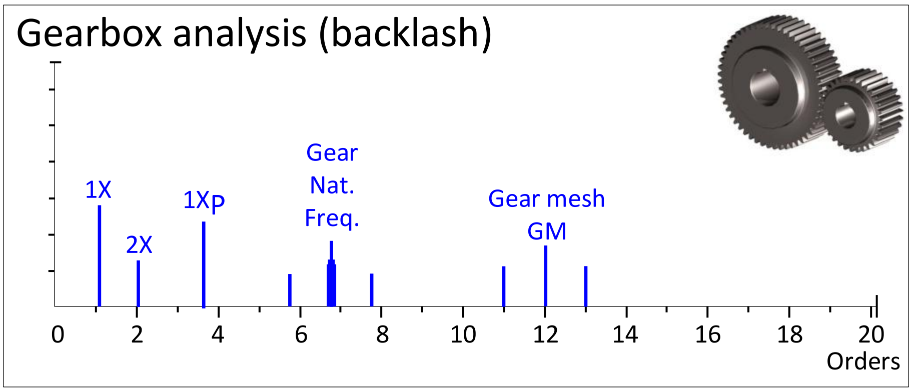
سعة عالية عند تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١، ٢ أو ٣ GMF).

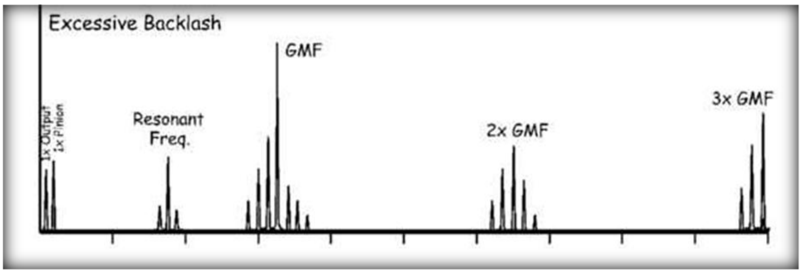
توصيات الأعمال "Recommended Actions"

لا شيء ما لم يكن هناك زيادة في نشاط التردد الجانبي "sidebands" أو من الممكن ظهور تردد الرنين "gear resonant frequencies" للترس.

٢-٢-٣- زيادة خلوصات تعشيق التروس "Excessive Gear backlash"

خلوصات تعشيق التروس "Gear backlash" سوف ينتج عنها ترددات جانبية لسرعة دوران العمود "shaft speed sidebands" حول تردد تعشيق التروس. قمة تعشيق التروس " gear mesh peak" وقمة التردد الطبيعي للترس "gear natural frequency peak" تنخفض في كثير من الأحيان مع زيادة الحمل عند زيادة خلوصات تعشيق التروس.





أعراض زيادة خلوصات تعشيق التروس "Excessive Gear backlash"

١- سعة عالية عند تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF).

٢- ترددات جانبية بسعة عالية حول تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF) عند سرعة الدوران لأحد أو كلا الترسين (١x rpm).

٣- قمة بسعة عالية "Amplitude peak" عند تردد الرنين "resonant frequency" للترس (التروس).

٤- ترددات جانبية عند (١x rpm) حول تردد الرنين.

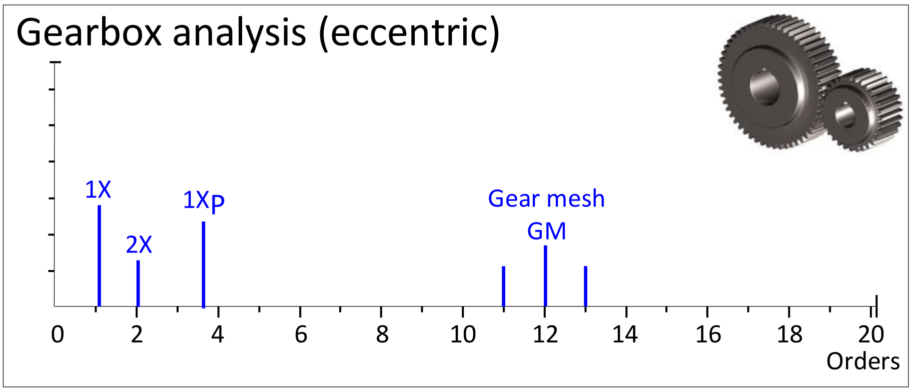
توصيات الأعمال "Recommended Actions"

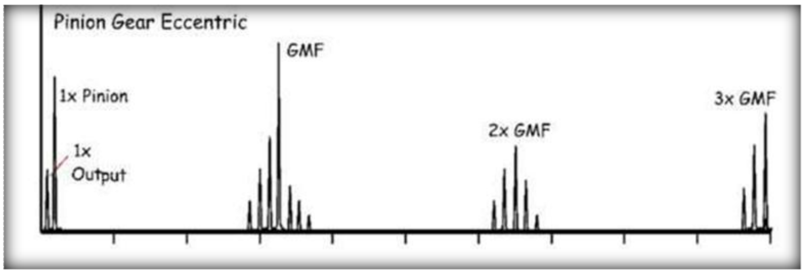
١- فحص التروس "Inspect gears" لمعرفة شكل التآكل "wear pattern" والتحقق من مناسبة عمق التعشيق "proper mesh depth".

٢- فحص التروس "Inspect gears" للتحقق من مناسبة البكلاش "proper backlash".

٢-٢-٤- عدم مركزية التروس أو التروس على الأعمدة المنحنية " eccentric gears and "gears with bent shafts

عدم مركزية التروس وكذلك التروس على الأعمدة المنحنية "bent shafts"، مرة أخرى سوف ترى الترددات الجانبية لسرعة العمود "shaft speed" المتسبب فى المشكلة حول تردد تعشيق التروس "gear mesh frequency" ولكن في كثير من الأحيان سترى فقط تردد جانبى مفرد "single sideband" بدلاً من عائلة من الترددات.





أعراض عدم مركزية التروس/التروس على الأعمدة المنحنية "bent shafts"

١- سعة عالية عند تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF).

٢- ترددات جانبية بسعة عالية حول تردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF).

٣- سعة عالية عند سرعة دوران العمود الذى به مشكلة (١ x rpm)، وإذا كانت المشكلة حادة "severe" تكون هناك توافقات لتلك سرعة الدوران.

توصيات الأعمال "Recommended Actions"

١- فحص التروس "Inspect gears" لمعرفة شكل التآكل "wear pattern" والتحقق من مناسبة عمق التعشيق "proper mesh depth".

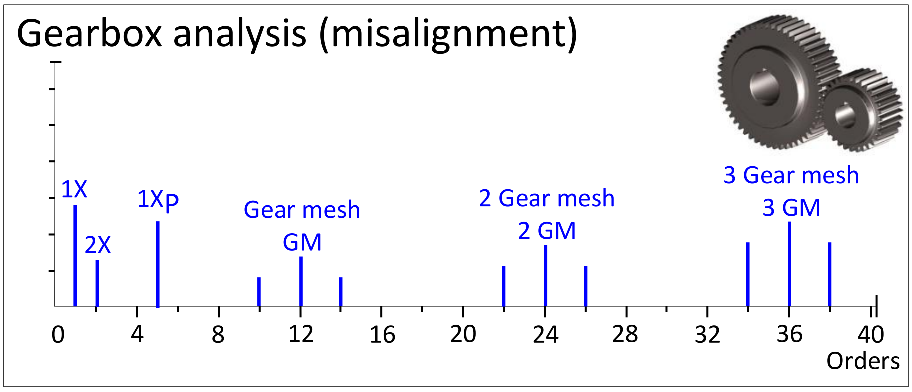
٢- فحص التروس "Inspect gears" للتحقق من مناسبة البكلاش "proper backlash".

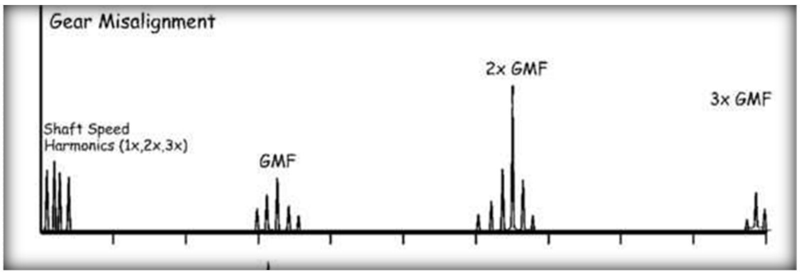
٢-٢-٥- عدم سنترة التروس "Misaligned gears"

عدم سنترة التروس "Gear Misalignment" يجعل الدوران الطبيعى للتروس أكثر صعوبة لأنها تشق طريقها بصعوبة خلال منطقة فيها أسنان التروس غير مسنترة.

مما يسبب تباطؤ الدوران. وبصمة الإهتزازات تحول هذه الظاهرة "phenomenon" إلى قمم بسعة عالية "amplitude peaks" عند ضعف سرعة دوران التروس (X٢) وضعف تردد تعشيق التروس (GMF x ٢) أو ترددات عالية لتعشيق التروس "high gear mesh frequencies" مع ترددات جانبية ومن الشائع أن ترى توافقات لتعشيق التروس "harmonics"، مع مستوى إهتزازات أعلى "higher levels" عند ضعف وثلاثة أضعاف "twice and three times" تردد تعشيق التروس (ولذلك من المهم زيادة مدى التردد "Fmax" "frequency range" بما يكفى لرؤية تلك الترددات).

كل هذه الأعراض وفى المقام الأول (GMF x ٢) قد تشير إلى وجود مشكلة عدم سنترة (عدم محاذاه) والتى ممكن أن تكون بطبيعة الحال ناتجة من سوء سنترة الكوبلنج " poor coupling alignment" أو غيرها من العوامل الخارجية مثل القدم المعلقة (سوفت فووت) "soft foot".





أعراض عدم سنترة التروس "Misaligned gears"

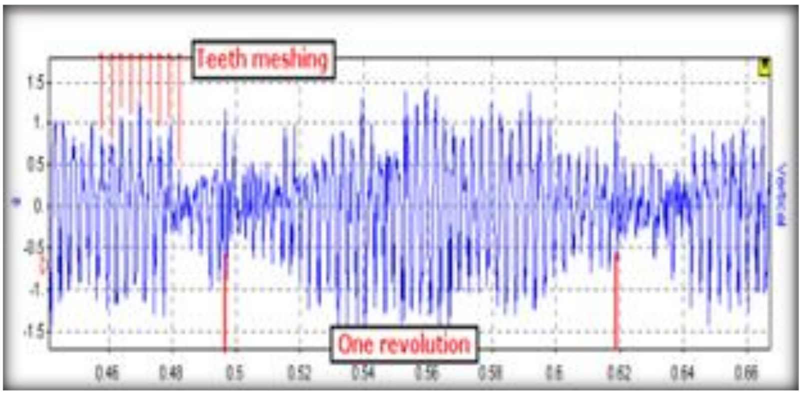
١- سعة عالية عند ضعف تردد تعشيق التروس (GMF x ٢).

٢- قمم سعة "Amplitude peaks" لتردد تعشيق التروس ومضاعفاته (١,٢و٣ GMF).

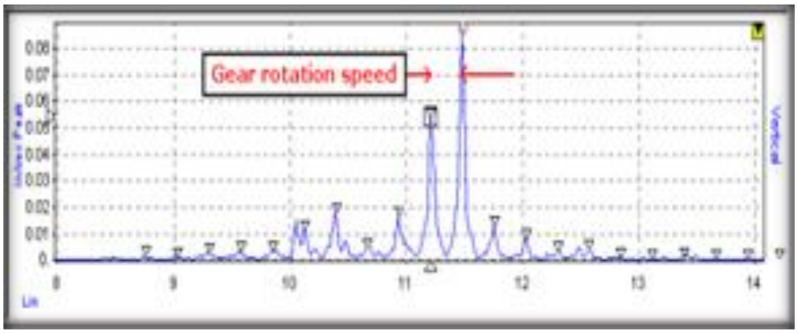
٣- ترددات جانبية بسعة عالية خاصة حول ضعف تردد تعشيق التروس (GMF x ٢) عند (rpm x ١) أو حتى عند (rpm x ٢).

٤- سعة عالية عند سرعة دوران العمود الذى عند (٢ x rpm) أو حتى عند (٣ x rpm).

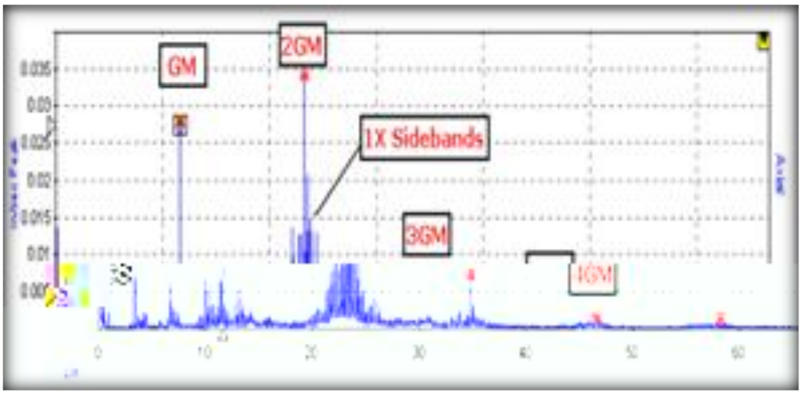
يمكننا أن نرى فى الشكل الموجى "time waveform" تآكل غير منتظم ومن المتوقع أن نرى تردد تعشيق التروس مع تردد جانبى من ١ X.



وإذا قمنا بتكبير "zoom" على تردد تعشيق التروس يمكننا رؤية الترددات الجانبية من X١ بوضوح.



وإذا قمنا بالتصغير "zoom out" يمكننا رؤية توافقات تردد تعشيق التروس. ويكون أكثر وضوحاً إذا لم نقم بعملية التكامل "not integrate" وسيكون أفضل عند إختيارنا المقياس اللوغاريتمى "logarithmic scale". وهذه البيانات غالباً ما يتم قياسها من الإتجاه المحورى "axial direction".



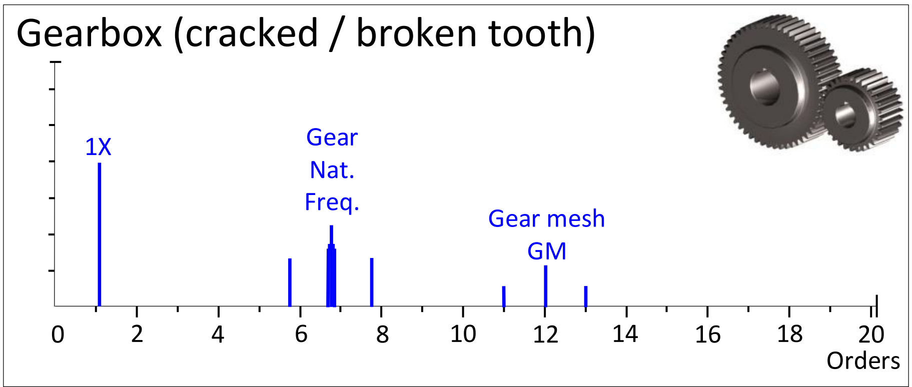
توصيات الأعمال "Recommended Actions"

١– فحص التروس "Inspect gears" لمعرفة شكل التآكل "wear pattern" حيث أن عدم السنترة ينتج عنها تآكل غير منتظم "uneven wear".

٢– التحقق من وجود مشاكل خارجية مثل عدم سنترة العمود "shaft alignment" والقدم المعلقة (سوفت فووت) "soft foot" إلخ.

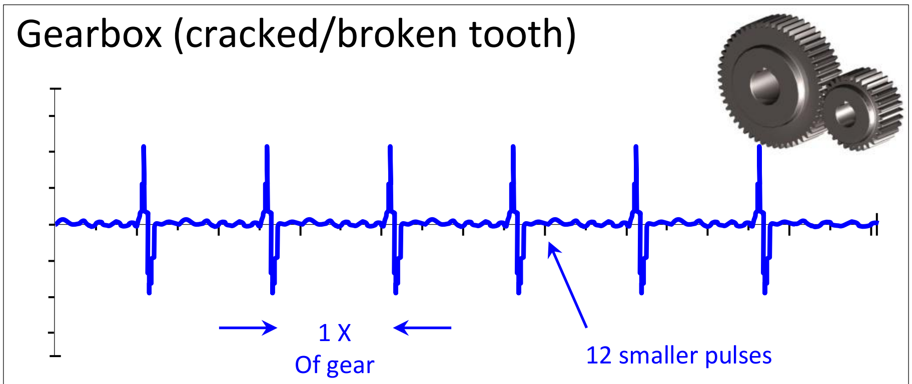
٢–٢–٦– شرخ أو كسر الأسنان "Cracked or broken tooth"

شرخ أو كسر أسنان الترس ينتج عنها قمة بسعة عالية "high amplitude peak" لسرعة دوران عمود الترس الذى به المشكلة، ويتسبب ذلك فى إثارة التردد الطبيعى للترس " gear natural frequency". وسيكون هناك ترددات جانبية "sidebands" من سرعة دوران ذلك الترس.



وأفضل طريقة لرؤية الشروخ أو الكسور لأسنان الترس يكون من خلال الشكل الموجى " time waveform". إذا كان هناك إثنى عشر سنة (١٢ teeth)، وواحده (١) من إحدى النبضات الإثنى عشر (١٢ pulses) فى الشكل الموجى تكون مختلفة عن النبضات الإخرى.

وبطبيعة الحال، فإن الفارق الزمني "time difference" بين هذه النبضات يكون مساويا الفترة الزمنية "period" من سرعة دوران "turning speed" ذلك الترس (تأتي الأسنان "tooth" في التعشيق "mesh" مرة كل لفة).



٢-٣- تردد الأسنان المتزاوجه "Hunting tooth frequency"

تردد الأسنان المتزاوجة (FHT) – هو ظاهرة "phenomenon" يحدث فيها تعشيق لسنتين متضررتين "damaged" – سنه من كل ترس – عند تردد معين "particular frequency". وبعبارة أخرى خلال الدوران العادى لهذه التروس تدخل هاتين السنتين إلى منطقة التعشيق " mesh area" معاً وتلامس كل منهما الأخرى.

فإذا كانت نسبة التروس "gear ratio" رقم صحيح مثل ١:١ أو ٢:١ أو ٣:١ وهكذا. فمثلاً فى حالة ما كانت نسبة التروس ٣:١ فإنه فى كل لفة تتقابل سنه معينة فى الترس الأول مع ثلاثة أسنان إخرى محددين فى الترس الآخر. وإذا كانت نسبة التعشيق ٤:١ فإنه أيضاً فى كل لفة تتقابل سنه معينة فى الترس الأول مع أربعة أسنان إخرى محددين فى الترس الآخر وهكذا.

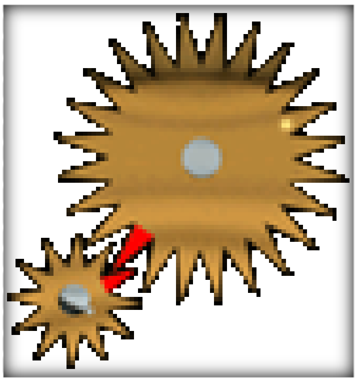
وهذه الأسنان المذكوره سابقاً تكون على إتصال أو تلامس "in contact" مرة كل لفة "revolution". ويكون نتيجة ذلك التلامس تآكل غير متساوى للتروس "uneven wear" – وبالتالى إذا حدث تلف صغير "small defect" فى إحدى الأسنان "one tooth" فإن تلك الأسنان التالقة سوف تتلامس مرارا وتكرار "repeatedly contact" مع الأسنان المقابلة لها فى الترس الآخر "other gear" مما يتسبب عن ذلك تمركز التآكل "localized wear" فى تلك الأسنان.

وفى هذه الحالة فإن التردد الناتج من الأسنان المتزاوجة "Hunting tooth frequency" سيكون منخفض نسبياً وأقل من السرعة الدورانية "rpm" لأى من الترسين.

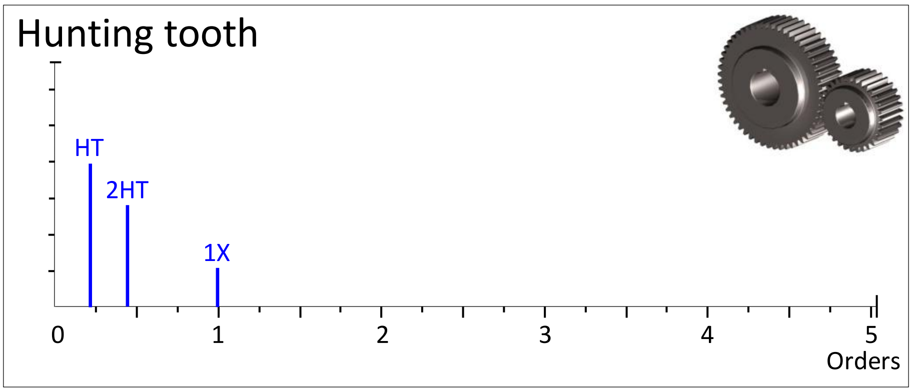
ولهذا السبب، لا يتم تصميم وتصنيع صناديق التروس بنسب تعشيق بسيطة (أرقام صحيحة "simple ratios" إلا للضرورة القصوى "absolutely necessary".

وبالتالى يجب أن يكون تردد الأسنان المتزاوجه "hunting tooth frequency" منخفض قدر الإمكان حتى يتم توزيع التآكل بالتساوى على كل أسنان الترسين.

وهذا لايتحقق إلا إذا كان عدد أسنان كل ترس "each gear" عدد أولى "prime number" (أى لا يقبل القسمة إلا على نفسه) وبالتالى يمكننا أن نتفادى أن تكون نسبة التروس "gear ratio" عدد صحيح.



ومن الناحية العملية، يستخدم تردد الأسنان المتزاوجه "hunting tooth frequency" فى إكتشاف مشاكل كل من الترسين "gear and pinio" والتى من الممكن أن تكون قد حدثت أثناء التصنيع "manufacturing" أو كنتيجة لسوء التعامل والمناوله "mishandling". وهو عادةً ما يكون تردد منخفض "low frequency" ويمكنك سماع صوت الهدر "growling" من صندوق التروس.



وفى الحقيقة يمكن تحديد هذا التردد (FHT) عن طريق العوامل المشتركة "common factors" لعدد الأسنان لكل ترس. وأفضل طريقة لشرح هذا التردد الغير عادي "unusual frequency" مع المثال التالى.

ترس عدد أسنانه ٢٤ سنه "24 teeth" وسرعته ٢٠٠٠ لفه فى الدقيقة يقود ترس آخر عدد أسنانه ٨٤ سنه "84 teeth".

$$\text{السرعة الخارجة (output speed)} = \frac{2000 \times 24}{84} = 571.4 \text{ لفة/ دقيقة}$$

ولحساب تردد الأسنان المتزاوجه "hunting tooth frequency" يجب أولاً أن نحدد العوامل المشتركة "common factors" لكل ترس. ولعمل ذلك ببساطه نقوم بعمل قائمة بالمضاعفات المحتملة لأسنان الترسين ثم نقارن بينهما.

ترس أسنانه ٨٤ سنه	ترس أسنانه ٢٤ سنه
1 x 84	1 x 24
2 x 42	2 x 12
3 x 28	3 x 8
4 x 21	4 x 6
6 x 14	
7 x 12	

ما هى العوامل المشتركة؟ الأرقام التى تظهر فى كل عمود هى: ١، ٢، ٣، ٤، ٦، و ١٢. والعامل المشترك الأكبر فى هذا المثال هو ١٢. ماذا لو كان عدد أسنان الترس القائد ٢٣ سنه؟ وحيث أن الأعداد الوحيده التى يمكن أن يكون ناتج ضربها ٢٣ هو ١×٢٣، لذا فالعامل المشترك بين أسنان الترسين سيكون ١ إذا لم يكن عدد أسنان الترس الآخر من مضاعفات الرقم ٢٣ بالضبط مثل (٢٣، ٤٦، ٦٩، ٩٢، ... وهكذا).

٢-٣-١- معادلة تردد الأسنان المتزاوجه "hunting tooth frequency"

Hunting Tooth Frequency =	(Gear Mesh Freq x common factors) / (#Teeth Pinion x #Teeth Bull Gear)

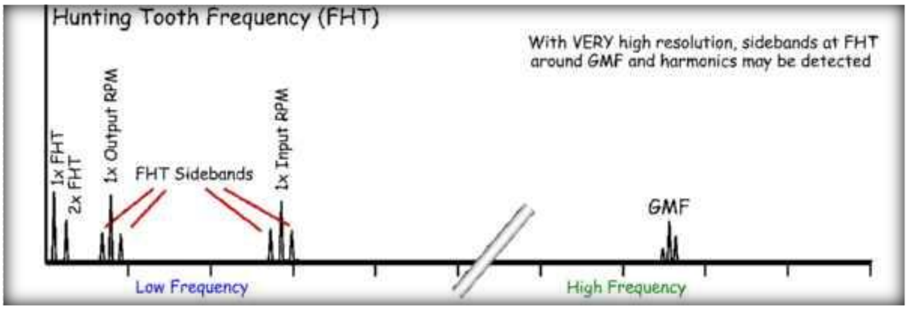
$$\text{تردد الأسنان المتزاوجه} = \frac{(\text{تردد تعشيق التروس} \times \text{العامل المشترك الأكبر})}{(\text{عدد أسنان الترس المنقاد} \times \text{عدد أسنان الترس القائد})}$$

$$\text{تردد الأسنان المتزاوجه} = \frac{(12 \times 48000)}{(24 \times 84)} = 285.7 \text{ سيكل/دقيقة}$$

فى هذه الحالة، التردد يساوى ٢٨٥,٧ سيكل فى الدقيقة. وتلك الأسنان التالفة "bad teeth" (واحده فى كل ترس) سوف يتعشقان معاً "mesh together" ويولدان نبضات إهتزازية عالية جداً " very high vibration pulse". والتى قد تبدو مرتفعة نوعاً ما ولكن عادةً لا يكون العامل المشترك الأكبر مرتفعاً للقيمة ١٢ – فغالباً ما سيكون قيمته ١.

لاحظ أنه كلما إنخفض العامل المشترك الأكبر كلما إنخفض تردد الأسنان المتزاوجه "FHT". فإذا كان عدد أسنان الترس القائد ٢٣ سنه بدلاً من ٢٤ فى المثال السابق، فستكون قيمة العامل المشترك الأكبر هى ١ وسيكون تردد الأسنان المتزاوجه ٢٤,٨٤ سيكل / دقيقه.

لاحظ أيضاً أنك سوف تحتاج إلى حل جيد للغاية للعثور على هذه الترددات المخفضة وظهورها فى بصمة الإهتزازات حيث يصعب ظهورها فى بصمة الإهتزازات التى يتطلب فيها نطاق واسع للتردد وذلك لإظهار تردد تعشيق التروس وتوافقاتها (أكثر من ٣ x تعسشيق التروس).



أعراض تردد الأسنان المتزاوجه "Hunting Tooth Symptoms":-

١- قمم السعة "Amplitude peaks" عند ١ × FHT وربما عند ٢ × FHT.

٢- ترددات جانبية من FHT حول ١X rpm (لكل عمود).

٣- ترددات جانبية من FHT حول ١X GMF وتوافقاتة.

٤- نبضات "Pulsing" ، وسماع صوت الهدر "growling" من صندوق التروس أو الموتور.

ملحوظة:-

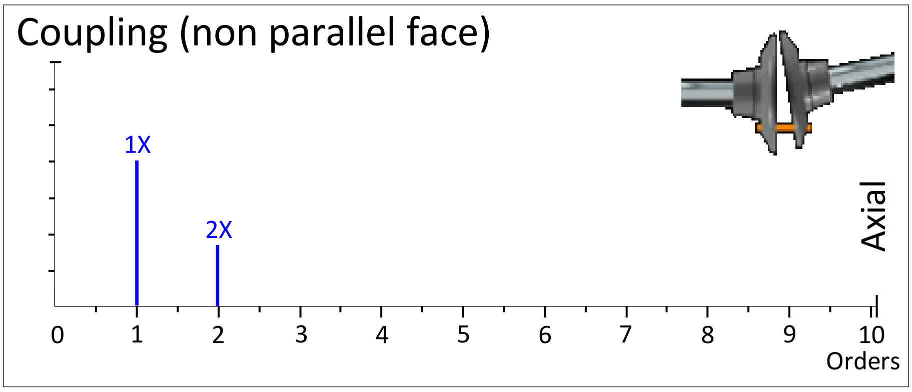
دقة إظهار البصمة "Spectrum resolution" تحدد إمكانية ظهور الأعراض السابقة. فى المثال السابق وعلى سبيل المثال للكشف عن الترددات الجانبية "sidebands" عند FHT (١٤٣ سيكل/دقيقة) حول تردد تعشيق التروس GMF x 1 (٤٨٠٠٠ سيكل/دقيقة)، سيتطلب ذلك قياس بصمة الإهتزازات بدقة "Spectrum resolution" ٤٥ سيكل/دقيقة/خط (cpm/line).

ونحتاج إلى دقة قياس حوالى 4000 خط "lines" (لايقل عن ٣٢٠٠ وتظهر بشكل جيد لو كانت ٦٤٠٠) لنطاق التردد الواسع (180,000 Fmax) اللازم لإلتقاط "capture" تردد تعشيق التروس وتوافقاتها (أكثر من ٣ x تعسشيق التروس).

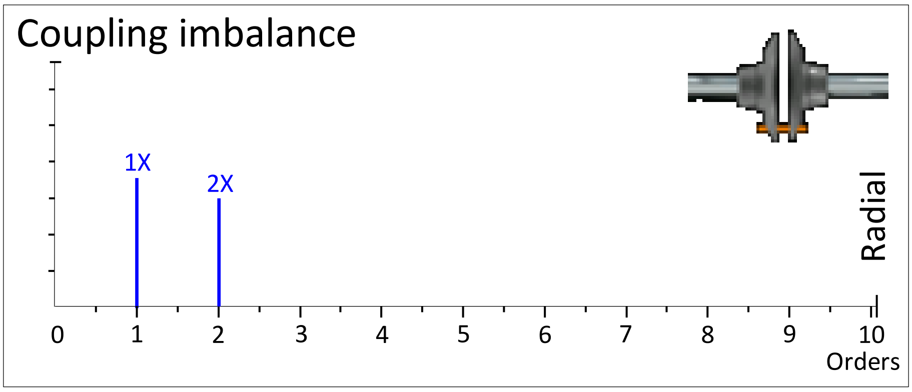
٣- تشخيص مشاكل الكوبلنج "Diagnosing coupling faults"

الكبالنج "Couplings" موجودة فى العديد من الأنواع "types" والأشكال "configurations"، ومشاكلها ينتج عنه علامات "symptoms" مشابه لعدم السنترة "misalignment".

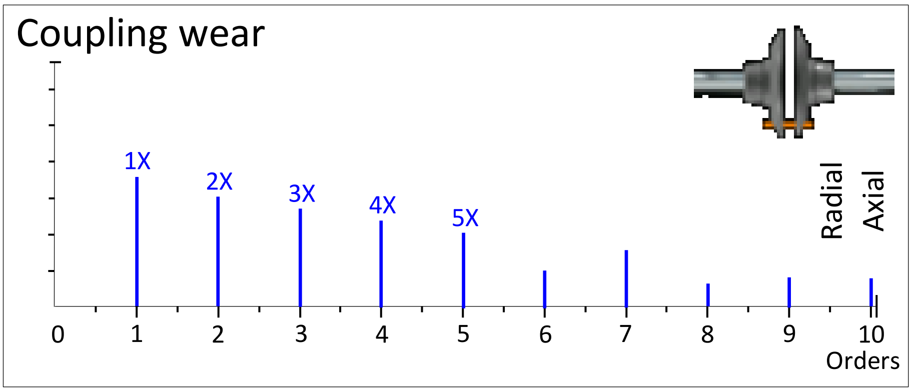
وكثيراً ما ينتج عن مشاكل الكوبلنج قمة بسعة عالية عند X١ كما يحدث فى عدم المحاذاه. إذا كان الكوبلنج غير صحيح "not true" (أى أن الشفتان غير متوازيتان "non-parallel flange faces") وفى هذه الحالة تكون بصمة الإهتزازات مشابه لعدم المحاذاه الزاوى "angular misalignment".



عدم إتزان الكوبلنج "Coupling imbalance" هو أيضاً من المشاكل الشائعة، وينتج عنها إهتزازات عالية عند X١ و X٢ فى إتجاه الراديال "radial".



تآكل الكوبلنج "Coupling wear" ينتج عنه علامات "symptoms" مشابه لعدم السنترة "misalignment" والتفكك "looseness".



٤- مشاكل سيور نقل الحركة "Belt-drive problems"

السيور الناقلة "Belt drives" تستخدم لنقل الحركة الدورانية من عمود إلى آخر وتستعمل عادةً فى أنظمة التسخين والتهوية والتبريد وهى شائعة الإستخدام وغير مكلفة ولكنها عرضة لكثير من المشاكل منها عدم محاذاه العمود "shaft misalignment"، عدم محاذاه الطنبورة " pulley misalignment"، تآكل السيور"belt wear"، رنين السيور"belt resonance"، السيور المشدودة جداً "belts too tight"، السيور المرخية جداً "belts too loose"، عدم مركزية الطنبورة " pulley eccentricity" وإنحناء الأعمدة "bent shafts".

وهذه الأعطال ترجع إلى مجموعة واسعة من المشاكل التي يمكن أن تحدث في تركيب وتجميع السيور"belt drive" وصعوبة القيام بعمل إختبارات فى موقع المعدة على السيور وإمكانية تأثرها بالمؤثرات الأخرى مثل القاعدة "base".

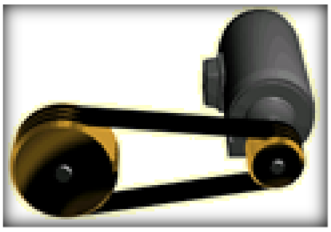
من المهم أن ندرك أن بعض مشاكل إهتزازات سيور نقل الحركة "belt drive" المذكورة سابقاً لا تحدث إهتزازات منسوبة للترددات المتعلقة بتلك السيور. المشاكل الناتجة بسبب كل من الأعمدة "shafts" أو الطنابير "pulleys" (عدم المحاذاة، اللامركزية وغيرها) تسبب إهتزازات عند سرعة دوران الجزء الذى به المشكلة (١X rpm) (معنى ذلك عدم مركزية الطنبورة على المروحة تسبب إهتزازات عند ١X سرعة دوران المروحه). ومن ناحية أخرى تآكل السيور"Worn belts" يسبب إهتزازات عند توافقات سرعة دوران السير"harmonics of belt running speed".

وفى حالة تآكل "wear" كل من (السيور والطنبورة) يكون من السهل نسبياً التفتيش عليها وتغييرها إذا لزم الأمر حيث أنها غير مكلفة. ومن الأفضل إستخدام أجهزة ضبط المحاور بإستخدام شعاع الليزر لعمل ضبط دقيق لسيور نقل الحركة بدلاً من إستخدام المسطرة العدلة (الإدة) "straightedge"، حيث أنها فقيرة فى الدقة "poor".

والخطوة الأولى لتحديد مشاكل سيور نقل الحركة هو تحديد سرعة السير "belt speed".

٤-١- تحديد سرعة سير نقل الحركة "Determining the Belt Speed"

معرفة سرعة السيور صعبة بعض الشئ ويمكن حسابها رياضياً إذا كنا نعرف بعض المتغيرات مثل قطر بكرة الموتور "pitch diameters" وقطر البكرة المدارة والمسافة بين مركز بكرة الموتور والبكرة المدارة أو طول السير"belt length".



يمكن حساب سرعة دوران السير كالآتى "calculate belt RPM":-

$$\text{سرعة السير "Belt RPM"} = ٣,١٤ \times PS1 \text{ سرعة دوران بكرة الموتور} \times \frac{PD1 \text{ سرعة دوران بكرة الموتور}}{BL \text{ طول السير}}$$

أو

$$\text{سرعة السير "Belt RPM"} = ٣,١٤ \times PS2 \text{ سرعة دوران بكرة الموتور} \times \frac{PS2 \text{ سرعة دوران البكرة المدارة}}{BL \text{ طول السير}}$$

أو

إذا كنت تعرف فقط حجم وقطر البكرة، يمكنك حساب طول السير تقريباً كالآتى:-

طول السير"BL" = ٢ (SD المسافة بين مركز بكرة الموتور والبكرة المدارة) + ١,٥٧ (PD1 قطر بكرة الموتور+PD2 قطر البكرة المدارة)

ويمكنا حساب سرعة البكرة المدارة كنسبة من أقطار الطنبورة "sheave diameters" كالآتى:-

$$PS2 \text{ سرعة البكرة المدارة (driven RPM)} = \frac{PS1 \text{ سرعة دوران بكرة الموتور } X PD1 \text{ قطر بكرة الموتور}}{PD2 \text{ قطر البكرة المدارة}}$$



ملحوظة:- مع تآكل السيور وإمتداده "stretch"، سوف تتغير نسبة السرعة "speed ratio"، وبالتالى حساب السرعة سيصبح غير دقيق ولا يبقى ثابت (من الصعب قياس الطول بدقة).

حيث:-

PS = سرعة دوران البكرة "Pulley rpm" (PS1 سرعة دوران بكرة الموتور، PS2 سرعة دوران البكرة المدارة)

PD = قطر البكرة "Pulley diameter" (PD1 قطر بكرة الموتور، PD2 قطر البكرة المدارة)

SD = المسافة بين مركز بكرة الموتور والبكرة المدارة "Distance between shaft centers"

BL = طول السير "Belt Length"

ويمكن معرفة سرعة السير بأن تتخيل قطع الحزام في المنتصف وإلتفافه "wrapping" حول إحدى البكرات - ماهى عدد مرات إلتفاف السير حولها مرتان؟ ثلاثة؟ هذا سوف يعطيك تقدير تقريبي جداً في عقلك لسرعة السير (إذا لف ٣ مرات سوف تكون السرعة ١/٣ سرعة هذه البكرة).

ويمكن أيضاً لمحلل الإهتزازات مع قليل من الممارسة إستخراج سرعة السير " belt rpm" من بصمة الإهتزازات. وذلك بتحديد قمم الترددات المتعلقة بأى من بكرة الموتور والبكرة المدارة وتوافقاتها (1x rpm and harmonics). والشرط المهم لنجاح ذلك يجب أن يكون فى بصمة الإهتزازات ترددات منسوبة للسير "belt-related frequencies".

٤-٢- حساب تردد السير "Belt freq."

القوة القسرية الأولى "forcing frequency" والمعروفة بإسم "belt rate" أو التردد الأساسى للسير. وهومعدل مرور نقطة على السير بنقطة مرجعية ثابتة "fixed reference point". وهى دائماً أقل من سرعة البكرتين.

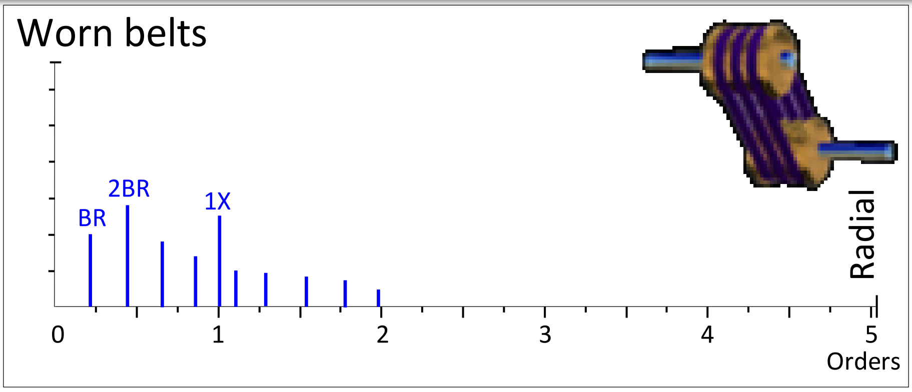
ويتم حساب تردد السير "Belt freq." على النحو التالى:-

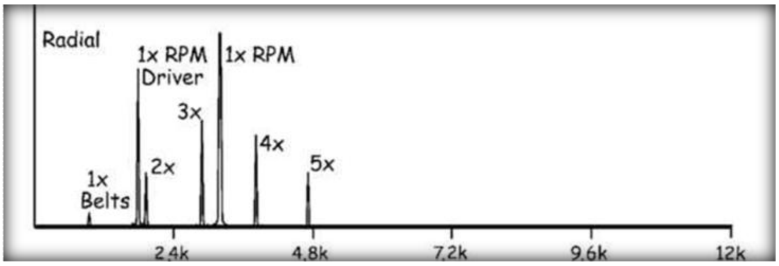
$$\text{"Belt freq." تردد السير} = \frac{\text{P1 X قطر بكرة X سرعة دوران الطنبورة}}{\text{طول السير}}$$

حيث P1 = ٣.١٤١٦

٤-٣- تهالك السيور "Worn belts"

إذا تهالك السير "worn" أو تفكك "loose" سوف ينتج عن ذلك قمة "peak" عند معدل تردد السير(BR) "belt rate" وتوافقاته، وتظهر قمة عالية عند ضعف هذا التردد (2BR) - عند وجود إثنان من الطنابير "two sheaves".

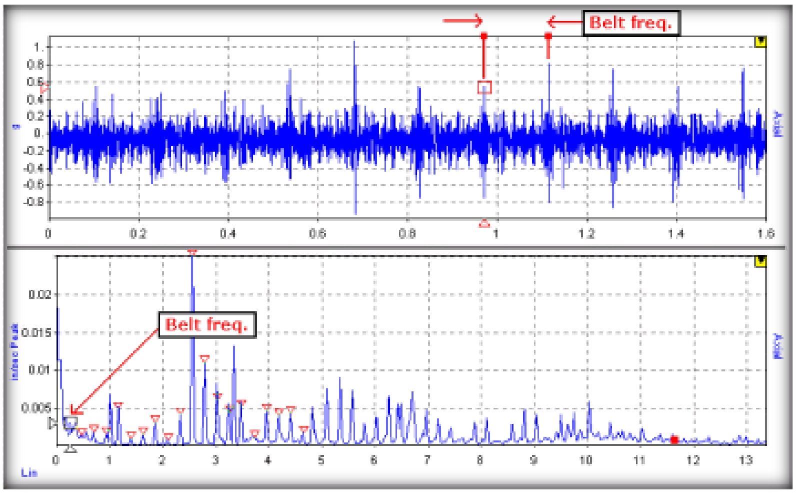




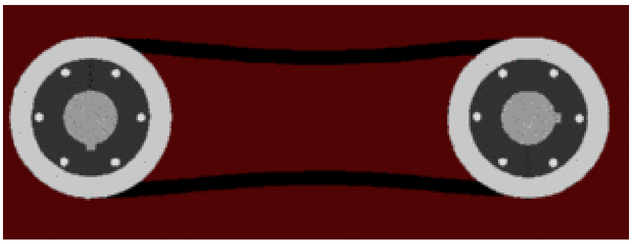
مثال:

فمثلا إذا قمنا بإتلاف جزء صغير من السير لعمل خطأ. كل مرة يصطدم هذا الجزء بالطنبورة "sheave" سنلاحظ وجود نبضة "pulse" فى الشكل الموجى "time waveform".

وهذه النبضة العابرة فى الشكل الموجى تولد توافقات كثيرة فى بصمة الإهتزازات وهذه النبضات والتوافقات يمكننا رؤيتهما بوضوح فى كل من البصمة والشكل الموجى.



الشكل الأتى يظهر رفرفة بالسير "Flap" نتيجة لمشاكل السير"Belt Problems".



علامات تآكل كل من السير/البكرات "Belt/Pulley"

١- إهتزازات عالية فى إتجاه الراديال عند (٢ x، ٣ x، ٤ x، ٥ x سرعة السير "belt rpm").

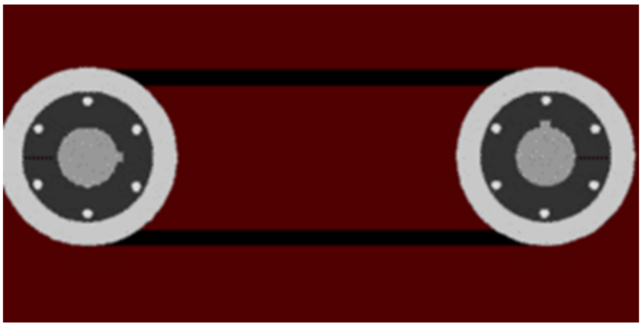
٢- غالباً ما تظهر رفرفة زايدة بالسيور "flap".

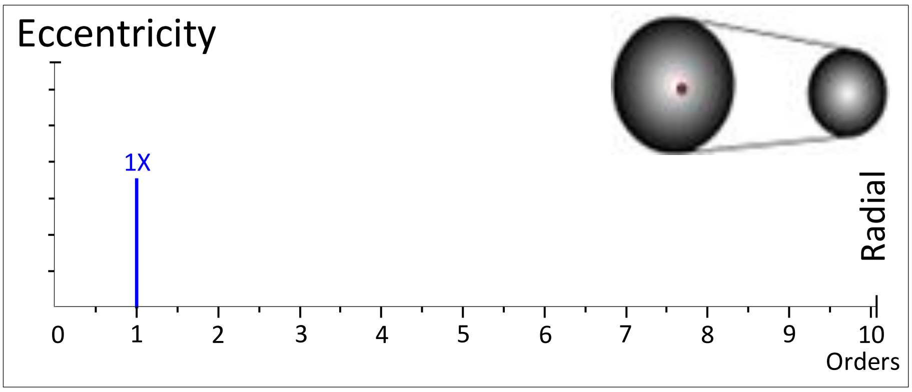
٣- إذا كان التآكل "wear" هو المشكلة فإن السيور و/أو البكرات سوف تظهر زيادة فى شكل التآكل.

٤- من الممكن أن يكون شد السيور هو المشكلة – السيور يجب ألا تكون مشدودة جداً "too tight" أو مرخية جداً "too loose".

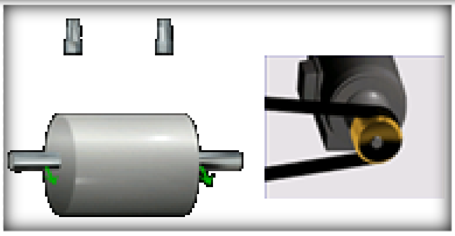
٤-٤- عدم مركزية الطنابير "Eccentric sheaves" وإنحناء الأعمدة "Bent Shaft"

تحدث عدم المركزية "Eccentricity" عندما يكون مركز الدوران يكون مزاحاً عن المحور الهندسى "geometric centerline" للبكرة أو الطنبورة، التروس، البللى، أو الروتور. وعلامات أو أعراض "symptoms" عدم المركزية مشابه لعدم الإتزان.

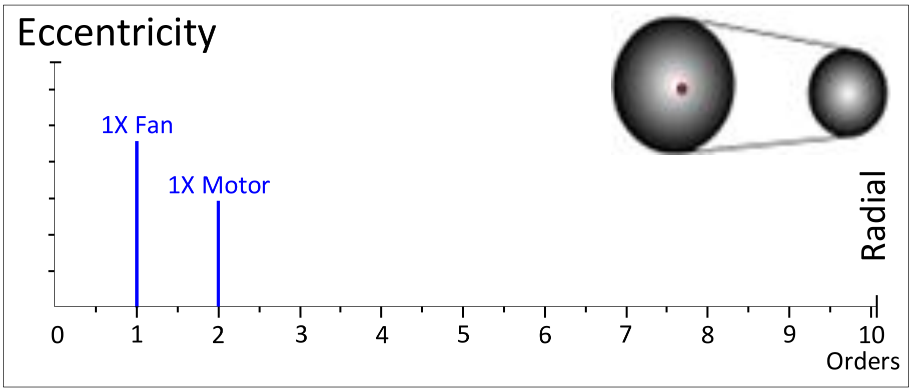




عدم مركزية الطنابير/التروس ينتج عنها إهتزازات بسعة عالية عند سرعة دوران الجزء الذى به المشكلة (X١ rpm) (معنى ذلك عدم مركزية الطنبورة على المروحة تسبب إهتزازات عند X١ سرعة دوران المروحه) خصوصاً فى الإتجاه الراديال "radial"، وخاصة فى الإتجاه الموازى للسيور، هذه الحالة شائعة جداً وتحاكى عدم الإتزان "mimics imbalance".



ستجد إهتزازات بسعة عالية عند سرعة الدوران (X١) عند كل من بكرة الموتور والبكرة المدارة "belt driven" (الموتور والمروحة على سبيل المثال) ونتيجة التغير فى السرعة لكل من بكرة الموتور والبكرة المدارة سنحصل على إثنين من الترددات المختلفة.



عدم مركزية فى حركة السيور يمكن التحقق منها عن طريق إزالة السيور والتأكد من وجود قمة إهتزازات عالية عند X١ على المحرك.



عند وجود بعض المشاكل الكهربية يتم التحقق من عدم مركزية روتور الدوران " eccentric rotors" وتأثيرة على شكل البصمة.

علامات عدم مركزية البكرات "Pulley Eccentricity" / إنحناء العمود "Bent Shaft" (بالقرب من البكرة)

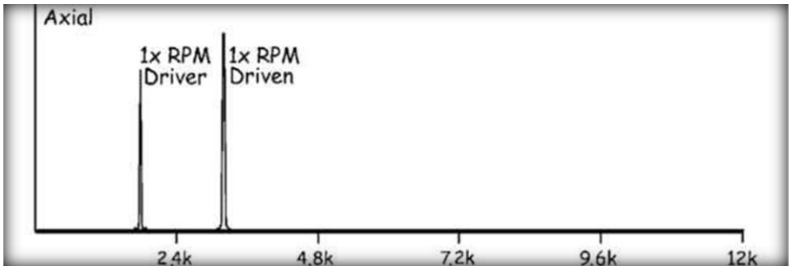
١- إهتزازات عالية فى إتجاه الراديال عند سرعة دوران كل من العنصرين - من الممكن بسهوله تشخيصه بالخطأ "misdiagnosed" على أنه عدم إتزان.

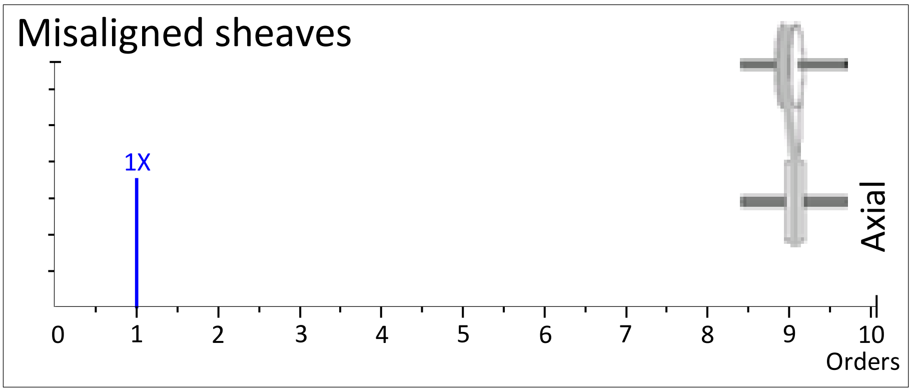
٢- كما تعمل السيور كأنها أربطة مطاطية "rubber bands" تتشد وتسترخى " stretched and relaxed" - وقوى رد الفعل الناتجة لا يمكن تصحيحها من خلال عمل الإتزان.

٣- زاوية الطور "Phase" سوف تظهر ٠ درجة أو ١٨٠ درجة حول رولمان البللى.

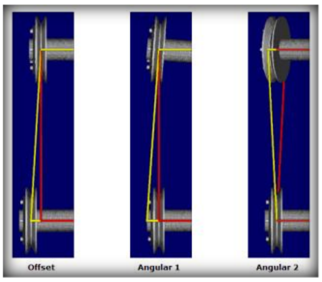
٤–٥– عدم سنترة البكرة "Pulley Misalignment"

عدم سنترة الطنبورة يمكن أيضاً إكتشافها وتشخيصها. حيث ينتج عنها إهتزازات عالية عند سرعة الدوران (X١) لكل من البكرتين وتظهر غالباً فى الإتجاه المحورى "axial direction". وفى بعض الأحيان سوف ترى توافقات لترددات السير "belt frequency" فى الإتجاه المحورى أيضاً.





البصمة تظهر عدم محاذاه البكرة والتى من الممكن أيضاً أن تكون نتيجة عدم محاذاه العمود "Shaft Misalignment" كما بالشكل.



علامات عدم سنترة البكرة "Pulley Misalignment"

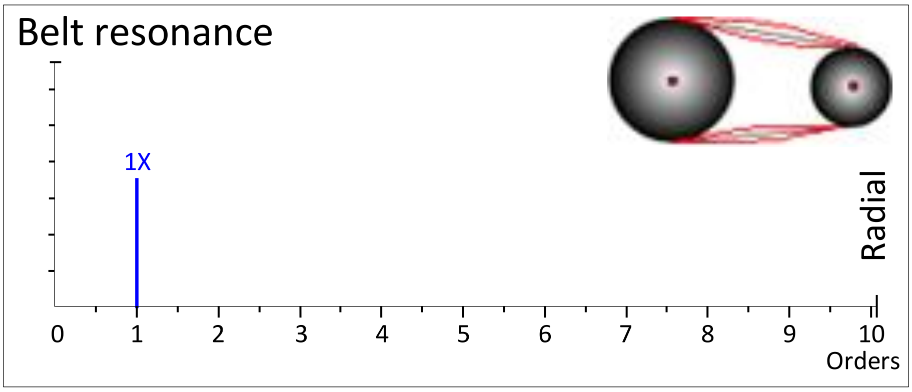
١– إهتزازات محورية عالية عند سرعة الدوران "RPM x١" لكل من البكرتين.

٢– تآكل محورى غير منتظم على كل من البكرات والسير.

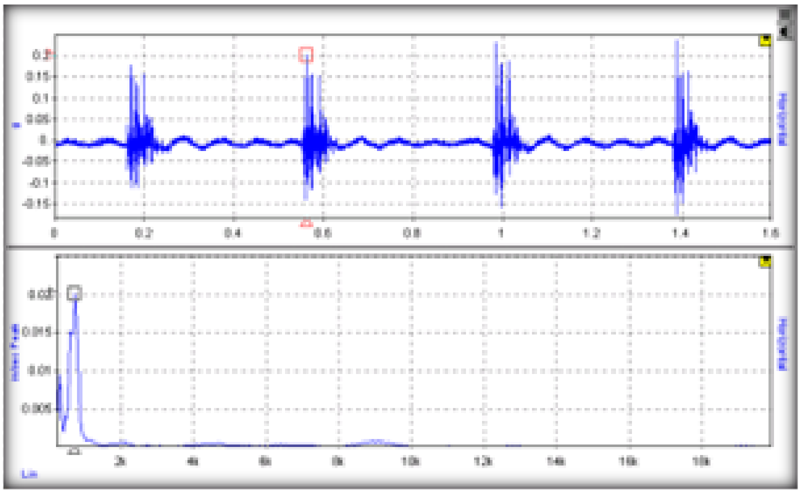
٤–٦– رنين السيور "Belt Resonance"

الرنين فى السيور يمكن أن ينتج عنه سعة عالية إذا توافق التردد الطبيعى للسير "belt's natural frequency" مع إحدى الترددات القسرية "Forcing Frequencies" أو بمعنى آخر تردد سرعة الدوران "RPM" لكل من طنبورة الموتور "drive sheave" أو الطنبورة المدارة "driven sheave"

وسرعة دوران السير "Belt RPM". ويمكن تغيير التردد الطبيعي للسير إما عن طريق تغيير طوله أوشده.



تردد رنين السير "Belt resonant frequency" يمكن التحقق منه بوضع لاقط الإهتزازات على رولمان البللى فى الإتجاه الراديال "radially" ورنين "twanging" السير يشبه أوتار الجيتار عند جمع الشكل الموجى أو بصمة الإهتزازات.



٥- الأرجل المعلقة "Soft Foot"

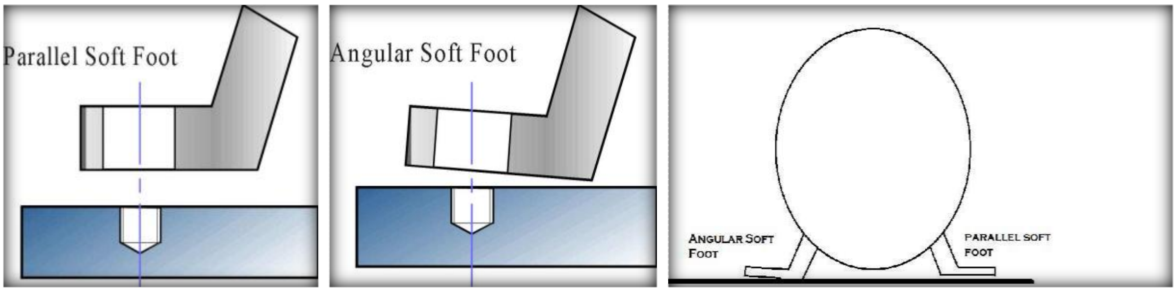
الأرجل المعلقة تحدث عند واحدة أو أكثر من الأرجل التى ليست على إتصال جيد مع القاعدة/الأرضية/الشاسية. وهى واحدة من أكثر المشاكل إنتشاراً لأنها مصاحبة لعملية السنترة، ويمكن أن ينسب إلى شاسيهات مشوه أومنحنية أو إلى الماكينة نفسها، خطأ فى تشغيل المعادن لأرجل الماكينة أو شاسية القاعدة أو أى مزيج من هذه المشاكل.

القدم المعلقة هى الحالة التى فيها أحد القدمين لا تجلس على أرضية مسطحة. القدم أو الأرضية من الممكن أن تكون مشوه. عند تشديد ربط المسامير على الأرجل، الماكينة سوف تتشوه.

القدم المعلقة هى مشكلة شائعة عند عمل محازاة للماكينات الدوارة. وهى السبب الرئيسى لتكرار المشاكل فى قياس محازاة الأعمدة. بالإضافة إلى جودة السنترة وتكرار المشاكل، من الممكن أن

تكون سبباً لإهتزازات الماكينات، وتقليل أعمار المحركات الكهربائية، وتسبب خلوصات داخلية فى صندوق التروس والطلمبات.

ولكن إذا إتخذت الإحتياطات المناسبة، القدم المعلقة من الممكن تقليلها والسيطرة عليها. مصطلح (القدم المعلقة) هو مصطلح شائع يستخدم للتعبير عن الإتصال غير المناسب بين غطاء الماكينة "machine casing" والقاعدة الأساسية "baseplate" المستخدمة لربط الماكينة. وهى إما تكون قدم لينة زاوية أو متوازية "angular or parallel soft foot" بل هى دائماً مزيج من الإثنين.



غالباً ما نقارن ذلك بالكرسى الخشبى عندما تكون إحدى الأرجل قصيرة وليست متلامسة مع الأرضية مما تسبب تأرجح فى الحركة عندما نجلس عليه. وهذه صورة ذهنية جيدة، القدم المعلقة فى الماكينات هى أكثر تعقيدا. وفى حين أن القدم المعلقة الزاوية "angular soft foot" تتلامس بشاسيه القاعدة أو الأرضية بطريقة غير منتظمة أو موحدة الإتصال. وبمجرد ربط القاعدة بالمسامير، تميل الأرجل إلى الإنحناء لتتطابق مع شاسية القاعدة المراد تثبيتة عليه.

٥-١- أسباب حالات القدم المعلقة

١- إلتواء أوتشوية أرضية الماكينة أوشاسيه القاعدة.

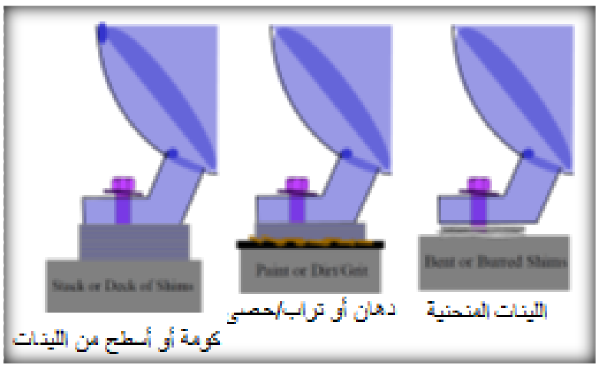
٢- إلتواء وتشويه أو تلف أرجل الماكينة.

٣- عدد غير مناسب من الحشو "shims" أسفل أرجل الماكينة.

٤- الأتربة والقمامة أو مواد غير مرغوب فيها أسفل أقدام الماكينة.

٥- الخدوش والعيوب الأخرى فى قاعدة الماكينة أو أرجل الماكينة.

٦- شدة التربيط على أرجل الماكينة بمفتاح ربط المسامير يسبب تشوية لأرجل الماكينة.



٥-٢- تأثير مشكلة القدم المعلقة "Soft foot"

تأثير القدم المعلقة على عملية السنتره كما ذكرنا سابقاً أن الحالات المختلفة للقدم المعلقة تؤثر بالسلب على جودة عدم المحاذاة وتكرارها. وبغض النظر عن الحالات المختلفة التى تسبب القدم المعلقة فإنها تتسبب فى نفس نوع المشكلة. وبمجرد ربط المسمار التى بها القدم المعلقة، فإنك تغير من الوضع النسبى للعمود "relative position". أى أن العمود يتغير وضعه عند رباط المسمار أو فكه. وإذا إستخدمنا جهاز ضبط المحاذاه بشعاع الليزر، يمكنك تحديد القدم المسببة للتغير الملحوظ فى القراءات الرأسية والأفقية كلما تم ربط مسمار معين. وهذا مكان القدم المعلقة.

تأثير القدم المعلقة على المحرك الكهربى

تأثير السوفت فوت "Soft foot" على أرجل المحرك الكهربى والقواعد المشوهة أو الملتوية "warped bases" من الممكن أن ينتج عنها إنحراف مركزى للإستاتور "eccentric stator". تغيير شدة الربط "Altering the tension" على مسامير أرجل المحرك "hold down bolts"، أو صيانة أساس الأرضية "foundation" تمكننا من حل هذه المشكلة.

٦- "Cocked bearing

"Cocked bearing" معناها وجود زاوية بين الجلبة الخارجية وبيت رولمان البللى "housing" أو الجلبة الداخلية والعمود "shaft" وهى شكل من أشكال عدم السنترة، وينتج عنها إهتزازات كبيره جداً فى الإتجاه المحورى، وغالباً ما تظهر قمم عند X١ و X٢ وكذلك X٣.



٦-١- سوء تركيب رولمان البللى "Poor installation"

تركيب رولمان البللى مهم جداً. فإذا إستخدم مطرقة "hammer" لوضع رولمان البللى فى مكانه، فإن العناصر المتحركة "rolling elements" ومجارى رولمان البللى "raceways" من المؤكد تلفها. وسوء التركيب يتلف العمود أيضاً "shaft" أو يحدث به خدوش "scratching". تلف تلك الأجزاء سوف تتسبب فى تغيير الإهتزازات تبعاً للضرر الناتج عن رولمان البللى.

على أية حال، يوجد بالفعل شكلين من أشكال الكوكيد لرولمان البللى "Cocked bearing" فإذا كانت الجلبة الخارجية لرولمان البللى "outer race" كوكيد فى بيت البللى " cocked in the housing" أما إذا كانت الزاوية بين الجلبة الداخلية لرولمان البللى "inner race" والعمود أى أن

الجلبة الداخلية لرولمان البللى "inner race" (كوكيد) على العمود "cocked on the shaft"، وسوف يظهر رولمان البللى أثناء حركته تمايل أو تأرجح "wobble".

ومع مرور الوقت وزيادة الأحمال على العناصر المتحركة "rolling elements" والمجارى "raceways" لرولمان البللى سوف يتسبب ذلك فى زيادة التآكل وإنهيار سابق لأوانه لرولمان البللى. ولكننا نستطيع إكتشاف هذه المشكلة وتصحيحها قبل أن يحدث هذا الإنهيار.

٦-٢- علامات وأعراض "Cocked Bearing"

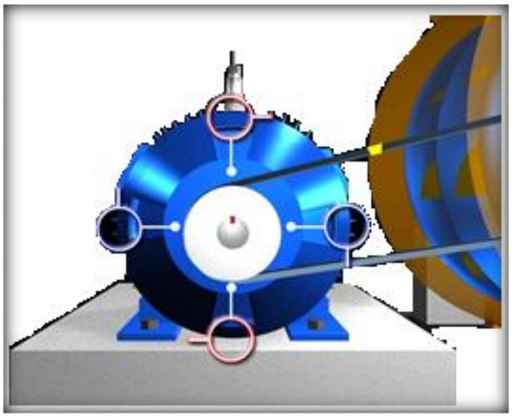
١- شكل وأعراض الإهتزازات مشابة جداً لعدم السنترة الزاوى "angular misalignment".

٢- سعة الإهتزاز "Vibration amplitude" تكون أعلى من المعتاد فى الإتجاه المحورى "axial" وبدلاً من ظهور ترددات إنهيار رولمان البللى (BPFI, BPFO, BSF, and FT) تظهر ترددات الإهتزازات عند سرعة الدوران (X١) وضعف سرعة الدوران (X٢) وأيضاً عند مضاعفات سرعة الدوران (rpm x١) "harmonics" وأيضاً يمكن حدوث زيادة فى سعة الإهتزازات. والمشكلة الوحيدة هي أن الاهتزاز عند هذه الترددات يمكن أن تكون مرتفعة لأسباب أخرى، مثل عدم الاتزان "unbalance"، عدم السنترة "misalignment" وإنحناء العمود "bent shaft ". (الشكلان ١ و ٢).

٣- ضعف سرعة الدوران (rpm x٢) فى الإتجاهين الإفقى والرأسى "radial" غالباً ما تكون عالية أو أعلى من سرعة الدوران (rpm x١).

٦-٣- علاقات الطور فى حالة الكوكيد لرولمان البللى

تحليل زاوية الطور "Phase analysis" يساعدنا فى تحليل المشكلة. فإذا كانت الجلبة الخارجية لرولمان البللى كوكيد فى بيت البللى، فإن قراءات الطور "phase" سوف تعتمد على نوع "cocked" (معنى ذلك أى قرب أو بعد النقط من على رولمان البللى من سطح الماكينة). عن طريق تحريك اللاقط "accelerometer" بأمان "safely"، سوف يجد محلل الإهتزازات "analyst" ١٨٠ درجة فرق الطور من إحدى جوانب العمود إلى الجانب الآخر أى من الجانب الأيسر إلى الجانب الأيمن أو من أعلى إلى أسفل.



وبتحليل الطور فى الإتجاه المحورى "Axial" فى حالة أن الجلبة الداخلية لرولمان البللى (كوكيد) على العمود، يظهر أنه كلما تحرك اللاقط حول سطح رولمان البللى عند مواضع مختلفة على مدار الساعة "clock positions"، فإن قراءات الطور سوف تتغير تبعاً لموقع اللاقط. ينتج عنه دورياً فرق فى الطور مقدارة ١٨٠ درجة. سيكون فرق الطور ٩٠ درجة عند التحرك من أعلى "top" إلى اليمين "right" إلى أسفل "bottom"، إلى اليسار "left" أو بمعنى آخر (من الساعة ١٢:٠٠ إلى ٣:٠٠ إلى ٦:٠٠ إلى ٩:٠٠). والشكل يوضح هذه العلاقات.

مثال ذلك، إذا كانت قراءة الطور ٠ درجة عند موضع الساعة ١٢، وستكون القراءة تقريباً ٩٠ درجة (أو ٢٧٠ درجة) عند موضع الساعة ٣:٠٠، وكذلك ١٨٠ درجة عند موضع الساعة ٦، و٢٧٠ درجة (أو ٩٠ درجة) عند موضع الساعة ٩:٠٠. إنظر لشكل رقم ٣ حيث تتغير زاوية الطور عندما يكون رولمان البللي "cocked" على العمود.

٧- مشكلة عدم كفاية التشحيم فى رولمان البللى "Inadequate Lubrication"

رولمان البللى هو من بين أهم الأجزاء فى الغالبية العظمى من الماكينات، ويصنع بمطلبات صارمة ليكون له القدرة على التحمل والموثوقية "reliability".

وبإستمرار البحث والتطوير لتكنولوجيا رولمان البللى أتيح للمهندسين حساب عمر رولمان البللى بدقة كبيرة. وبالتالى جعل عمر البللية وعمر خدمة الماكينة متطابقة بكل دقة.

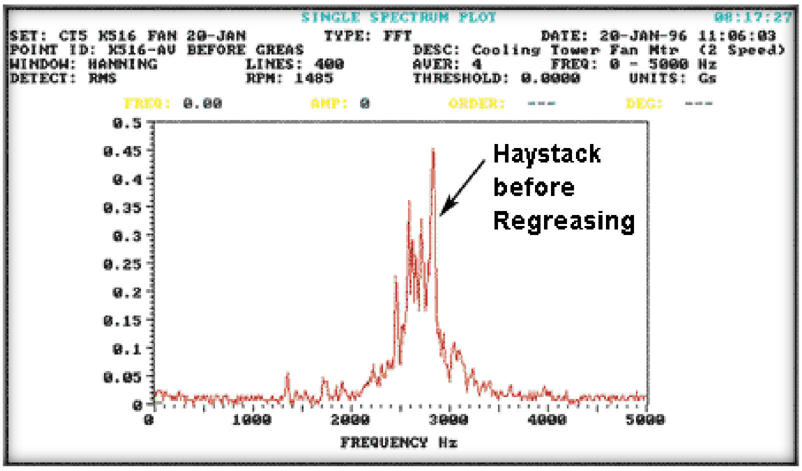
ولسوء الحظ، فإنه يحدث فى بعض الأحيان أن هذا البللى لا يحقق العمر الإفتراضى المحسوب. وهناك أسباب كثيرة لهذا – الحمل أكبر مما كان متوقعاً، عدم كفاية أو عدم صلاحية الزييت، إهمال فى التخزين والمناولة، مانع التسريب "seal" غير صالح أوالخلوصات ضيقة جداً "too tight" مما يسبب خلوصات داخلية غير كافية "internal clearances". كل هذه العوامل تترك نوع خاص بها من الضرر وتترك بصمات خاصة تابعة لها أيضا على رولمان البللى.

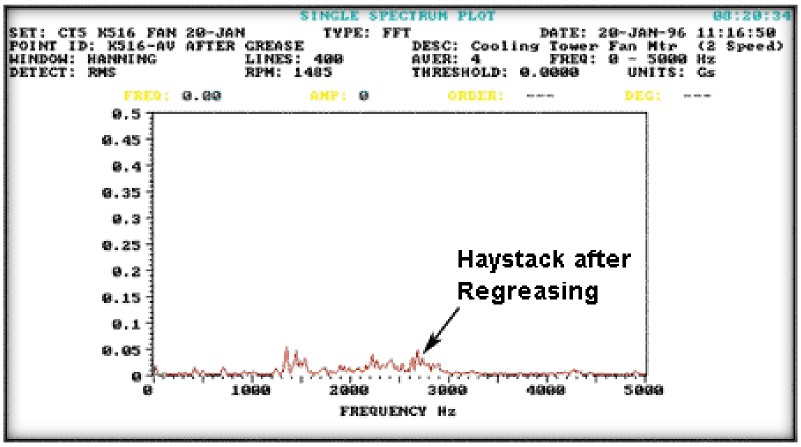
فى بعض الحالات، ممن الممكن إكتشاف تأثير عدم كفاية الشحم خلال رولمان البللى من خلال الإستفادة من تحليل الإهتزازات كأداة فى الصيانة التنبؤية. وهى إمكانية للكشف عن نقص التشحيم أو التزييت "lubrication deficiencies" مع تحليل الإهتزازات عند سماع ضوضاء صادر من رولمان البللى.

نلاحظ فى بصمة الإهتزازات الآتية وجود كومة مثل كومة القش "haystack effect" فى نطاق تردد بين ٢ كيلو هرتز و ٣,٥ كيلو هرتز. ويعتمد نطاق التردد لكومة القش على حد كبير على نوع رولمان البللى وسرعة الدوران والحمل إلخ. (إنظر إلى بصمة الإهتزازات الآتية).

بعد تشخيص وتحليل المشكلة يتم إضافة كمية محددة من الشحوم لرولمان البللى. ومن خلال إعادة القياس بعد التشحيم وبعد توزيع الشحم خلال رولمان البللى يمكننا مشاهدة التأثير الفورى لهذا التشحيم فى بصمة الإهتزاز.

حيث نجد إنخفاع كبير فى كومة القش "haystack effect" ولا تظهر مرة أخرى.





٨– مشاكل تسرب التيار الكهربى "Current leakage problems"

مشاكل تسرب تسرب التيار الكهربى هي المشكلة الأكثر شيوعاً والموجودة في جميع الماكينات الدوارة، وخاصة مواتير التيار المستمر "DC motors"، والآن نرى هذه المشكلة على نحو متزايد فى محركات التيار المتردد "AC motors".

مرور التيار يمكن أن يحدث لأسباب متنوعة (تشمل ضعف الأرضى "poor grounding" عند تنفيذ أعمال اللحام، إنهيار العزل "insulation breakdown" مشاكل الفرش "brush problems" فى مواتير التيار المستمر، وغيرها من الأسباب).

عندما يمر التيار الكهربى من خلال رولمان البللى، الشحنات الكهربائية تمر خلال مواد التشحيم ومجارى رولمان البللى للجلب الداخلية والخارجية وكذلك العناصر المتحركة (الكور والبلح)،

وتتولد حرارة نتيجة تفريغ الشحنات الكهربية "electrical discharges"، تسبب إنصهار موضعى "local melting" للسطح المعدنى "metal surface" لرولمان البللى.

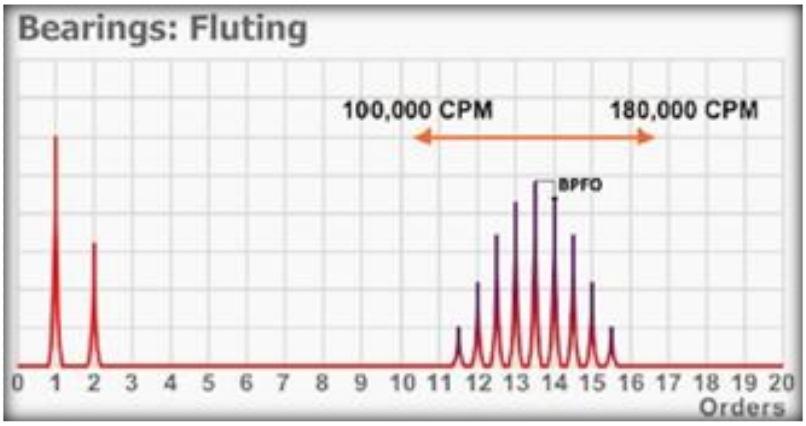
ويظهر شكل حفر "fluting pattern" مطبوعة على سطح رولمان البللى. هذا النمط أو الشكل غير مألوف، على الرغم من أننا يمكنا تمييزة جداً، كما هو مبين بالشكل الآتى.



وزيادة الإهتزازات "Excessive vibrations"، تسبب زيادة الحرارة، زيادة الضوضاء " noise levels"، وتقلل من فاعلية "effectiveness" زيوت التشحيم وتقلل من عمر رولمان البللى.

وشكل البصمة من على سطح رولمان البللى، عبارة عن سلسلة من القمم "series of peaks" تتجمع معاً فى نطاق الترددات العالية "high-frequency band"، وعادةً ما تكون محصورة بين ١٠٠,٠٠٠ و ١٨٠,٠٠٠ CPM (سيكل لكل دقيقة). ويعتقد ظهور تلك القمم فى هذا النطاق نتيجة لإثارة رنين رولمان البللى "bearing resonance"، وبالتالى يتوقف ظهورها أساساً على نوع رولمان البللى. والقمم من الممكن أن تحتوى على ترددات الجلبة الخارجية أو الداخلية لرولمان البللى "BPFO, BPFI" وأحياناً تردد العناصر المتحركة "BSF".

ومع ذلك فإنه غالباً ما تظهر (BPFO، BPFI، الخ) في الترددات المنخفضة كما بالبصمة التالية:



٨-١- أضرار تسرب التيار الكهربى

١- نتيجة لتنفيذ بعض أعمال اللحام ووضع الأرضى بالقرب من المحرك الكهربائى. سيسبب ذلك تفريغ للتيار الكهربى بأمبير عالى، مما ينتج عن ذلك لحام "weld" أجزاء رولمان البللى الداخلية مع بعضها البعض.

٢- تحت تأثير مرور التيار الكهربى سوف ترتفع درجة الحرارة موضعياً لرولمان البللى وينتج عن ذلك تغيير فى تركيب مواد التشحيم مما يقلل من فاعليته وكفائته ويستهلك بشكل أسرع، والشحم يتحول إلى اللون الأسود ويتصلب، ويقل عمره ويسبب إنهيار رولمان البللى.

٣- معظم المحركات صممت لتعمل أكثر من ١٠٠ ألف ساعة وبسبب ذلك ممكن أن تنهار فى أقل من شهر واحد.

٤- هذه المشكلة تؤدى إلى زيادة الضوضاء والإهتزازات من رولمان البللى، وفى نهاية المطاف يؤدى إلى الإنهيار الكامل لرولمان البللى.

٨-٢- كيفية الحد من مشكلة تسرب التيار الكهربى

١- إختيار رولمان البللى بشكل صحيح تبعاً للتطبيق.

٢- تغيير رولمان البللى بنوع آخر معزول "isolated type" ووضعه فى الجانب الخارجى للمحرك أى فى الجهة الغير مقادة "non-drive side" ووضع فرشاة فى الجانب الآخر أى فى الجهة المقادة "drive side" من أجل السماح لإنتقال التيار الكهربى بأمان إلى الأرض "ground" ومنع التسريب الكهربى "electrical leakage".

٣- عدم إستخدام ماكينات اللحام بالقرب من المحركات الكهربائية.

٩- مشكلة إنزلاق العناصر المتحركة لرولمان البللى "sliding – Skidding"

إذا تم إختيار رولمان البللى بشكل صحيح تبعاً للتطبيق، وكانت مواد التشحيم تعمل بشكل صحيح، والأحمال مناسبة على العناصر المتحركة "rolling elements" (الكوروالبلح)، فإن العناصر المتحركة ستتحرك وتلف بنعومة تامة وبشكل مستمر فى مجارى رولمان البللى "raceways". ومع ذلك، فإنه من الشائع بالنسبة للعناصر المتحركة أن تنزلق "Skidding" من وقت لآخر عندما لا يتم استيفاء هذه الشروط.

وهذا أكثر شيوعاً لرولمان بللى الموتور من الجهه الحرة "non-drive-end"، وخاصة فى الماكينات الرأسية، والآن أكثر شيوعاً مع رولمان البللى الإسطوانية "cylindrical roller". وفى بعض الحالات يحدث الإنزلاق عند بداية تشغيل الماكينة، أو فى الأيام الباردة وذلك لأن زيوت التشحيم تكون أكثر لزوجة "more viscous".

وفى حالات كثيرة، عندما نراقب الإنزلاق، فإن جرعة من الشحوم "shot of grease" قد توقف رولمان البللى من الإنزلاق. ولكن فى وقت لاحق بعد دقائق أو ساعات سوف يستأنف مرة أخرى.

في الواقع هناك عدد من الحالات "situations" التي يمكن أن يحدث بها انزلاق ففى حالة الإنزلاق "skidding" (وهو زحف أو هروب العناصر المتحركة فى الإتجاه الجانبى أى فى إتجاه عدم التحميل "unloaded")، وفى حالة الإنزلاق "sliding" (وهو زحف أو هروب على السطح فى

الإتجاه الأمامى أى فى إتجاه الحركة أو القوة) والحالة الأخيرة وهى حركة العناصر المتحركة على سطح رولمان البللى الداخلى به تشوهات أو تلف وتسمى "smearing".

ولكن الآن يتم التركيز على إنزلاق العناصر المتحركة خلال الجزء غير المحمل " unloaded portion" من رولمان البللى"skidding" (معنى ذلك الجزء المقابل من منطقة الحمل"load zone").

وأعتقد أنه غني عن القول إن الإنزلاق هو ضار جداً لرولمان البللى. وإحتكاك المعدن بالمعدن "metal-to-metal contact" تسبب زيادة التآكل، وتتولد الحرارة. وفى أكثر من حالة يحدث حرائق "fire"/أو إنفجارات "explosions".

شكل أو نمط "pattern" الإهتزازات سوف يتغير عندما ينزلق رولمان البللى. وعندما يحدث الإنزلاق (من الممكن أن يحدث على فترات متقطعة). ومن الشائع سماع صوت عالى النبرة من رولمان البللى عند حدوث الإنزلاق. ويكون كافياً لشد إنتباهك، وبالنظر إلى عجلة الموجة الجيبية "acceleration time waveform" سوف تظهرمستويات عالية من (G) غالباً ما تكون أعلى من ١٠ Gs.

والترددات العالية الموجودة "الضوضاء"، تسبب إثارة "excite" الرنين لرولمان البللى " bearing resonance" (كما موضح عند حدوث تعرجات أو حفر "fluting"). وفى هذه الحالة نتوقع حدوث حدوب "hump" تشبة قمة الجبل فى بصمة الإهتزازات.

فى حالة تلف سطح رولمان البللى الداخلى ،من الممكن أن نلاحظ أن القمم "peaks" عند ترددات إنهيار رولمان البللى أصبحت مشوهة (أوسع وأقصر) وذلك لأن ترددات الإهتزازات غير متناسقة.

٩-١- الإنزلاق والخلوص الزائد (قلة الشحط) "Sliding and loose fit"

هناك مشكلة أخرى يمكن أن تصادفك هى إنزلاق الجلبة الداخلية لرولمان البللى على العمود "slides on the shaft"، أو إنزلاق الجلبة الخارجية فى بيت رولمان البللى " outer race slides in the housing"، بسبب الخلوص الزائد (قلة الشحط)، ومن الشائع أن نرى قمة "peaks" عند X٣ (والتوافقيات) تزداد سعتها عندما يكون البللي ينزلق على العمود، ويمكنك أيضاً أن تشاهد زيادة فى قمة X٤ عندما يكون رولمان البللى مفكك فى بيتة "loose in the housing".

٩-٢- معاينة رولمان البللى "Observe the bearing"

يوصى بشدة بأن تنظر بإهتمام على سطح رولمان البللى عندما يتم إزالتة من الماكينة. سوف يدلك على نوعية العطل "failure mode".

أغلب الموردين لرولمان البللى تقدم تطبيقات بملاحظات مصورة تسمح لك أن تتعرف على العلامات "markings" الموجودة على سطح البللى. مما يساعدك على تحديد السبب الرئيسى لإنهياره "root cause". حيث أن شكل السطح سيزودنا بالعلامات التى تفسر لنا سبب المشكلة إذا

كان رولمان البللى ينزلق على العمود "slipping on a shaft" أومفكوك فى بيتة " loose in the housing"، أو إنزلاق الأجزاء المتحركة "rollers are skidding"،. إنظر الشكل الآتى:-



٩-٣- إستخدام الإستروبسكوب "stroboscope"



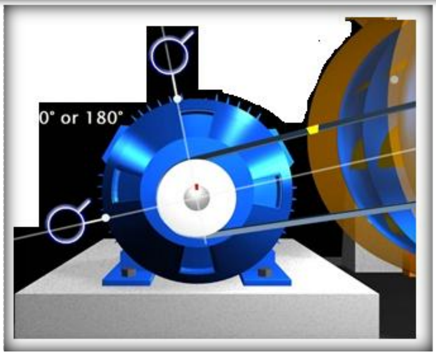
الإستروبسكوب وهو أداة لقياس سرعة الدوران والتردد. إذا كان غطاء رولمان البللى يمكن إزالته بأمان بحيث تظهر العناصر المتحركة، الإستروب سكوب يمكننا فى المساعدة فى تشخيص "diagnose" مشاكل الإنزلاق "slipping and skidding" التى ناقشناها سابقاً. إذا جعلت الإستروب سكوب متزامن "synchronized" مع سرعة عمود الدوران، لا يمكن أن ترى حركة نسبية بين الجلبة الداخلية والعمود. وإذا كان الإستروب متزامن مع تردد القفص " cage frequency"، القفص سوف يظهر كأنه ثابت إذا لم يحدث إنزلاق. وسوف لا يتغير الوضع النسبى للجلبة الخارجية مع بيت البيلية "housing".

٩-٤- الإستنتاج "Conclusion"

يوجد عدد من الأعطال الخاصة برولمان البللى والتى يمكن إكتشافها من خلال تحليل الإهتزازات "vibration analysis" ويجب التفكير بجدية فى الأسباب الجذرية "root cause" التى كانت سبباً فى العطل. ونحن بحاجة إلى برنامج جيد لمراقبة حالة المعدات الدوارة " good vibration monitoring program".

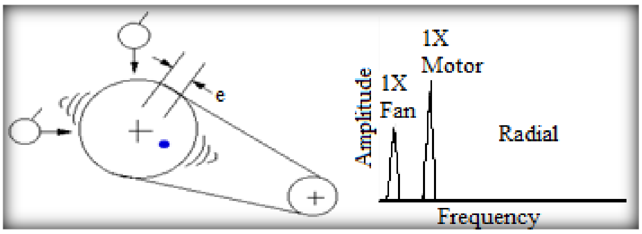
١٠- عدم مركزية الدوران "Eccentric rotor"

عدم مركزية الدوران "Eccentricity" تحدث عندما يتم إزاحة "offset" مركز الدوران " center of rotation" من خط الوسط الهندسى "geometric centerline" للبكرة أوالطنبورة "sheave"، التروس "gear"، رولمان البللى "bearing"وإلخ.



ويكون أعلى إهتزاز فى الإتجاه المحورى للسير "belt". وبالتالى يتم أخذ القياسات فى هذا الإتجاه كما هو مبين بالشكل. وسوف يكون هناك إختلاف فى الطور بين القياسات التى تؤخذ فى إتجاه محور السير وعند الزاوية القائمة بهذا الإتجاه من ٠ إلى ١٨٠ درجه.

ملاحظة أننا لا نأخذ قياسات الطور فى الإتجاهين الرأسى والأفقى الصحيحين. نحن نأخذ قياس واحد على نفس الخط مع السير والآخر على زاوية قائمة من هذا الإتجاه.



١- تتميز عدم المركزية بزيادة الإهتزازات عند ١ X RPM فى إتجاه خط وسط "centerline" العضو الدوار"rotors".

٢- محاولات عمل الإتزان لعدم مركزية الروتور "Eccentric rotor" تؤدى فى كثير من الأحيان إلى تخفيض الإهتزازات فى إحدى الإتجاهات، وتزداد فى الإتجاه الراديال الآخر" radial direction" (إعتماداً على مقدار عدم المركزية).

٣- مقارنة قراءات زاوية الطور "phase readings" فى الإتجاهين الأفقى والرأسى عادةً يكون الفرق إما ٠ درجة أو ١٨٠ درجة (كل واحدة منها تشير إلى حركة خط مستقيم).

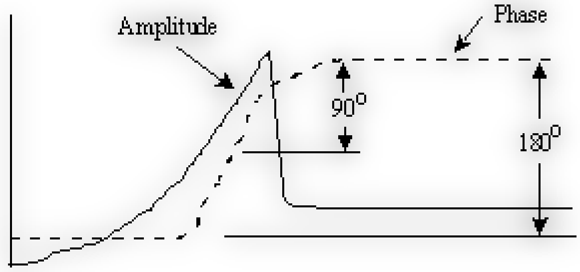
١١- تردد الرنين "Resonance frequency"

إذا كانت الترددات المحيطة بالتردد الطبيعى من نفس قيمته وزاويته فإننا نطلق عليها بترددات الرنين أما إذا كانت من مضاعفات هذا التردد فنسميها بالترددات التوافقية "Harmonics".

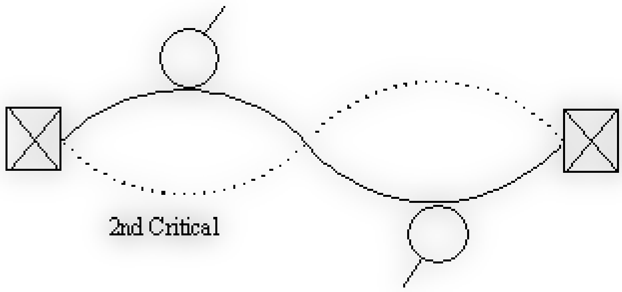
على سبيل المثال لو أن لدينا محركاً كهربائياً قابل لتغيير السرعة وله قدرة عاليه فإنه ينبغي علينا أن نتجنب زيادة سرعة المحرك إلى سرعة تسمى السرعة الحرجة لأنه عندها يكون تردد الاهتزازات الميكانيكية للمحرك مكافئاً لتردده الطبيعي. وعند توافق ترددين أو أكثر فإن قوة إشارة الإهتزازات تتعاظم أكثر فأكثر وتتحول إلى طاقة اهتزازات عالية الشدة تؤدي إلى دمار المحرك.

ويحدث الرنين "Resonance" عندما تتطابق أو تتزامن "coincides" التردد الجبرى " Forcing Frequency" مع التردد الطبيعى للنظام "System Natural Frequency"، ويمكن أن يسبب تضخيم مثير للسعة "dramatic amplitude amplification" التى من الممكن أن تحدث إنهيار سابق لأوانه أو حتى إنهيار كارثى "catastrophic failure".

وقد يكون التردد الطبيعى ناتج من العضو الدوار "rotor" وفى كثير من الأحيان ينشأ من هياكل الماكينة والأرضية "foundation" وصندوق التروس أو حتى من السيور. إذا كان الروتور يعمل عند أو بالقرب من الرنين، سيكون من المستحيل عمل الإتزان بسبب التغير الكبير فى زاوية الطور حيث يمر (٩٠ درجة عند الرنين وما يقرب من ١٨٠ درجة عندما يمر خلال التردد). وغالباً ما نحتاج إلى تغيير مكان التردد الطبيعى "natural frequency location". مع العلم بأن الترددات الطبيعية لاتتغير مع تغير السرعة، وهذا يساعد على تسهيل التعرف عليه.



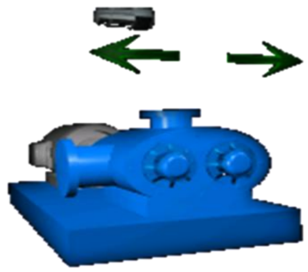
Typical Spectrum



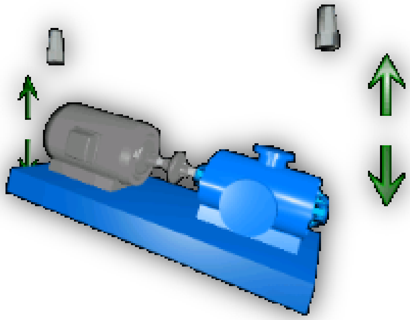
Phase Relationship

١١-١- تشخيص حالات الرنين

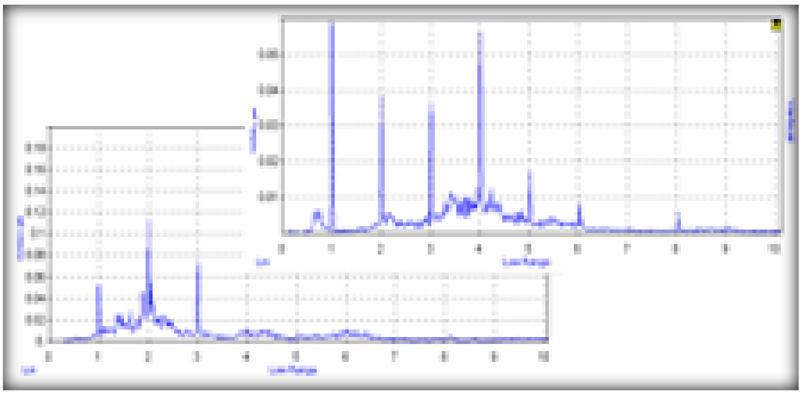
الرنين هو حالة التشغيل عندما تكون قوة الإثارة "excitation frequency" قريبة من التردد الطبيعى لهيكل الماكينة "machine structure".



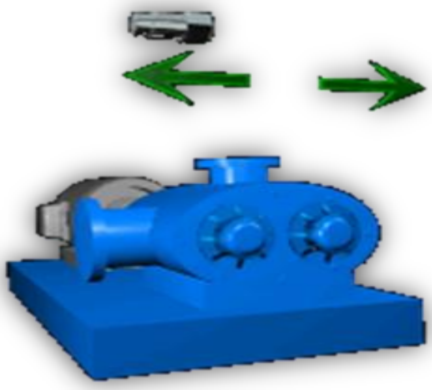
هيكل الماكينة المثالى "machine structure" يحتوى على العديد من الترددات الطبيعية " natural frequencies". وعندما يحث الرنين، فإن مستوى الإهتزازات يكون عالياً جداً ويمكن أن يسبب أضرار سريعة.



والرنين يظهر فى بصمة الإهتزازات بمثابة قمة "peak" بتردد ثابت حتى وإن تغيرت سرعة الماكينة. والقمة تكون حادةً جداً "quite sharp"، ومن الممكن أن تكون عريضة "broad" تعتمد على مقدار التخميد المؤثر"effective damping".



بيانات الطور "Phase data" تكون مفيدةً جداً عند تشخيص حالات الرنين. زاوية الطور بين مصدر إثارة الإهتزازات "excitation source" وإستجابة هيكل الماكينة " response of the structure" هى دائماً ٩٠ درجة عند التردد الطبيعى.



فى حالة الروتورات الطويلة "long rotors" كما فى التربينات، التردد الطبيعى يسمى الترددات الحرجة "critical frequencies" أو السرعات الحرجة "critical speeds" ويجب أخذ الحيطة بأن لا تعمل هذه الماكينات عند سرعات (X١ أو X٢) تتوافق مع الترددات الحرجة.

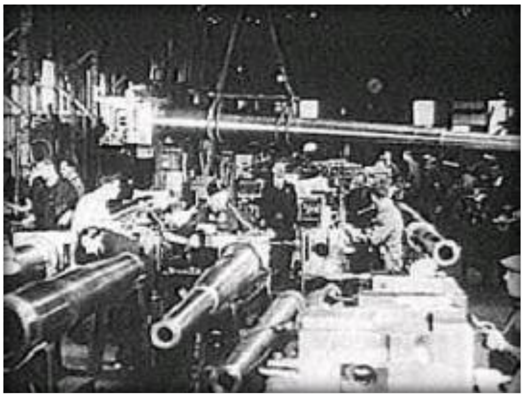
إذا لم يكن هناك طاقة لإثارة الرنين، فإنك لن ترى أى علامة "sign" فى بيانات الإهتزازات. ومع ذلك إذا كان تردد الرنين يتزامن مع إحدى الترددات (X١ و X٢ أو تردد الريش) على سبيل المثال، فسيزيد مستوى الإهتزازات ويظهر كأنه قمة عالية جداً تجلس على رابية "hump" من قمم صغيرة.

وإذا كانت الماكينة تحتوى على الرنين، يتم القيام ببعض الإختبارات الآتية لتحديده:–

١١–٢– الإختبارات اللازمة لمعرفة تردد الرنين

١١–٢–١– إختبار الصدمة "Bump tests"

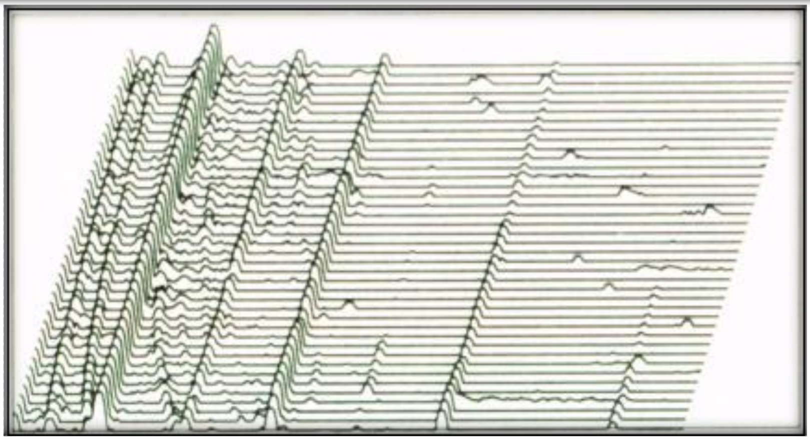
فى إختبار الصدمة، يتم عمل خبطة أو صدمة "impacted" بكتلة ثقيلة "heavy mass"، مثل قطعة من الخشب أثناء قياس (تسجيل) بيانات الإهتزازات. وفى هذه الحالة يتم تسجيل بيانات الإهتزازات عند التردد الطبيعى "natural frequencies". يمكنك ضبط جهاز جامع الإهتزازات بإختيار إسلوب "peak-hold averaging mode" والضرب على الماكينة عدة مرات.

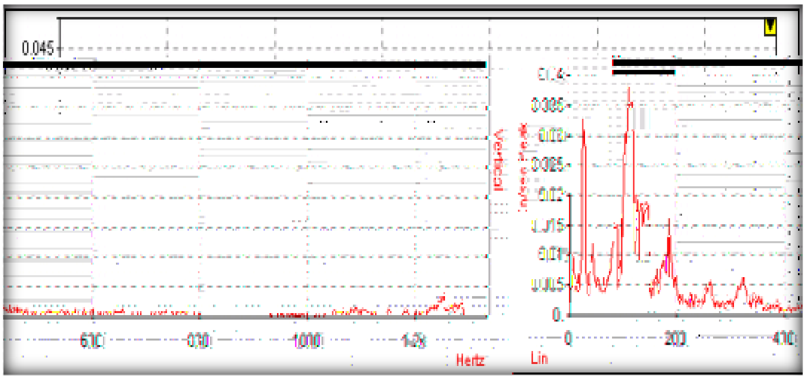


١١–٢–٢– تشغيل الماكينة أو إيقافها "Run Up or Coast Down"

يتم تشغيل الماكينة "turned on" أو إيقافها "turned off"، أثناء قياس بيانات الإهتزازات ويمكن إستخدام بيانات التاكوميتر "tachometer data" إختيار يا لقياس زاوية وسرعة الدوران. وإذا كان جهاز جامع الإهتزازات يحتوى على هذه الخاصية من أنواع الإختبارات، فسيكون لديك سلسلة من بصمات الإهتزازات "series of spectra"، وسوف تجد قمم واحدة أو أكثر عند ترددات الرنين "resonant frequencies".

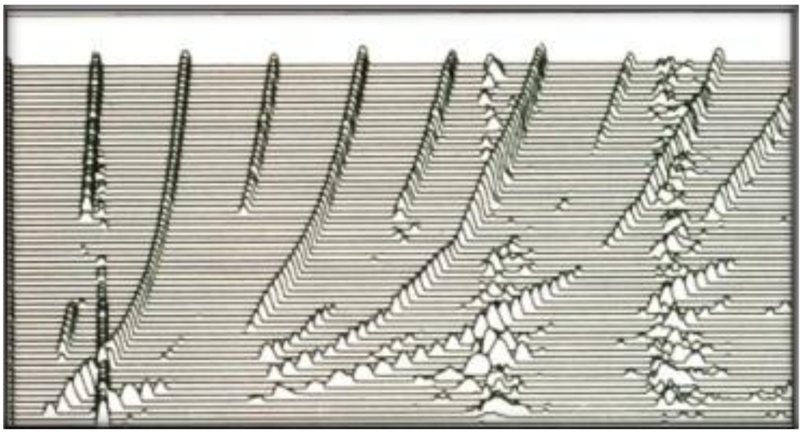
من ناحية أخرى، إذا تم ضبط جهاز جامع البيانات على "peak-hold averaging mode" وبدأت فى عمل الإختبار بتشغيل الماكينة أو إيقافها "Run Up or Coast Down"، فإن البصمة النهائية سوف تحتوى على قمم عند تردد (ترددات) الرنين.



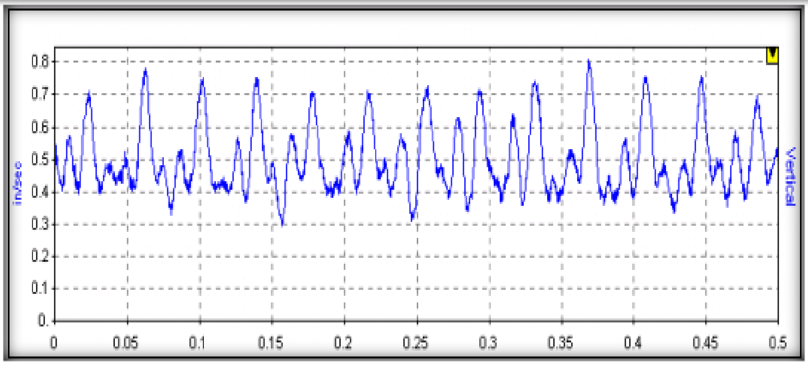


١١-٢-٣- إختبار تغيير السرعة "Variable speed test"

مع الماكينة متغيرة السرعة، من الممكن تغيير السرعة أثناء إلتقاط بيانات الإهتزازات وأيضاً بيانات التاكوميتر "tachometer data" لقياس زاوية وسرعة الدوران– كما وضحنا ذلك سابقاً فى إختبار التشغيل والإيقاف.



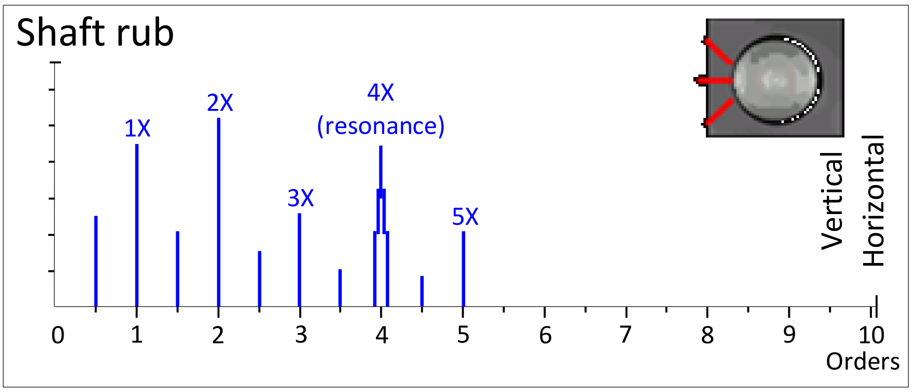
ويمكننا أيضاً مشاهدة الشكل الموجى كلما تغيرت سرعة الماكينة، السعة ستكون كبيرة عندما تكون الماكينة تعمل عند تردد الرنين.

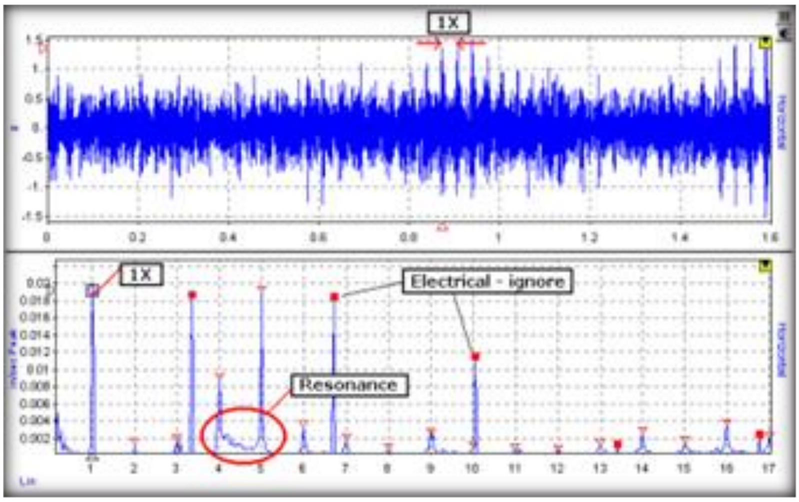


١٢- إحتكاك الروتور "Rotor rubs"

تشخيص إحتكاك الروتور "Diagnosing rotor rubs"

الإحتكاك سوف يظهر خصائص مماثلة لتفكك الروتور. سوف ترى توافقات لسرعة الدوران (X١)، وغالباً تظهر قمم الإهتزازات عند توافقات ٢/١ سرعة الدوران. وفى كثير من الأحيان يكون رنين واحد أو أكثر يتم إثارتها بالإحتكاك (X٤ كما فى هذا المثال).

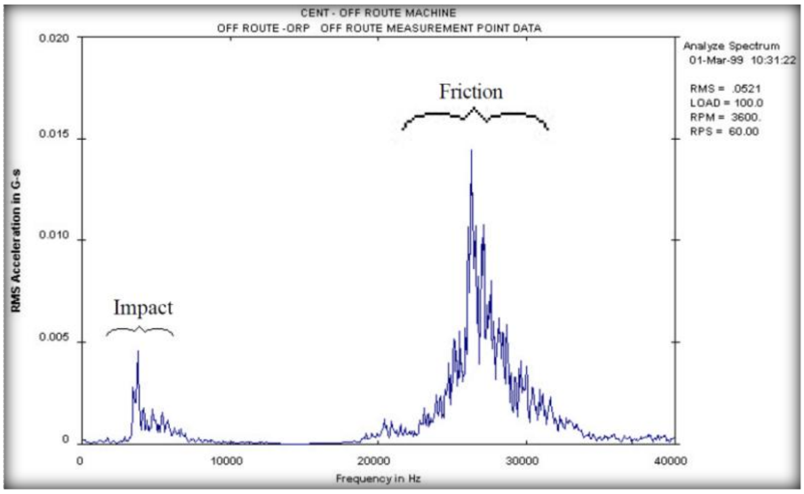




ملاحظة:- لاحظ قمم ذات صلة بالمشاكل الكهربية عند ضعف تردد الخط " twice line frequency" (تم تحديدها بالعلامة الحمراء) يمكن تجاهلها. ومما يثير الإهتمام أيضاً أن الإحتكاك أثار الرنين عند حوالى ٤-٥ X ولهذا تجد أن قمم X٤ وX٥ أعلى من القمم الأخرى.

لاحظ أيضاً أن الشكل الموجى يظهر به صدمات وعبور لحظى أو دورى "transients" كلما زاد الإحتكاك بشكل دوري (من الممكن أن نجد ترددات جانبية نتيجة تأثير "modulation effect"). الزمن بين "transients" يساوى فترة "period" الدوران.

والبصمة التالية تظهر تأثير الإحتكاك والصدمات.



القسم الثالث:– القوى الهيدروليكية والهوائية "Hydrolic and aerodynamic forces"

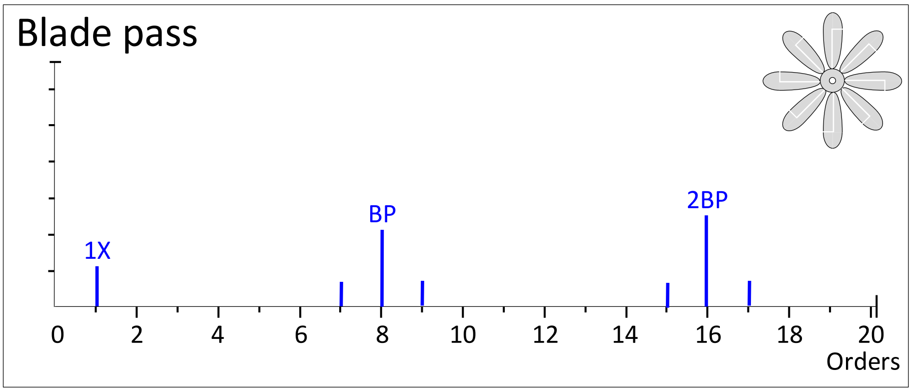
١– ريش المراوح أو الطلمبات أو الضواغط "Blade pass" أو "vane pass"

عادةً ما يظهر فى بصمة إهتزازات الخاصة بجميع الطلمبات "pumps" والمراوح "fans" والضواغط "compressors" قمة "peak" عند تردد الريش "Blade pass" أو " vane pass". وهذه القمة تنتج من حاصل ضرب عدد الريش فى سرعة عمود الدوران "RPM".

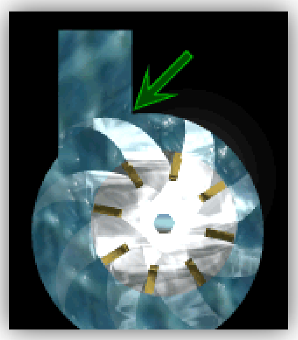
Vane pass = Number of vanes x RPM
Blade pass = Number of blades x RPM

١–١– مشاكل الريش "Blade faults"

سعة "amplitude" الإهتزازات الخاصة بقمة "peak" تردد الريش من الممكن أن تزيد إذا كانت الثغرة "gap" بين الريش ومخارج الهواء الثابتة "stationary diffusers" غير متساوية.

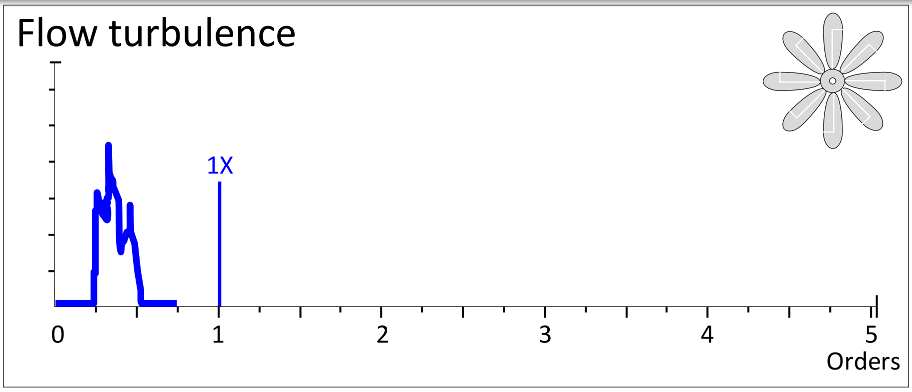


ومن الممكن أن يزيد أيضاً نتيجة الإعاقة أو الإنسداد "obstructions" ووجود إنحناءات حادة "sharp bends" فى مسار السريان "flow path" عند حافة الشكل عند مسار الخروج " discharge passage".



١–٢– إضطراب السريان "Flow turbulence"

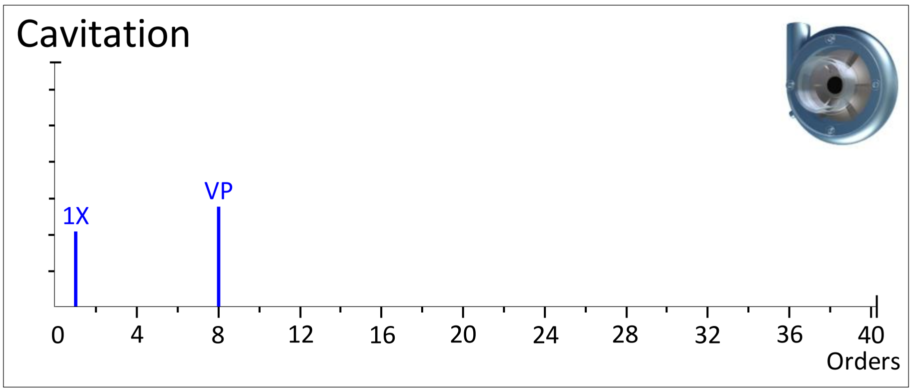
إضطراب السريان "Flow turbulence" ناتج من تغير فى الضغط "pressure" أو السرعة "velocity" للهواء المار "air passing" خلال المروحة "fan" أو النفاخ "blower".



هذه الظاهرة "phenomenon" تحدث بشكل عشوائى "random"، مصحوبة بإهتزازات منخفضة التردد "low frequency". ويكون مدى ترددها يبدأ من ٥٠ إلى ٢٠٠٠ دورة/دقيقة (CPM).

١-٣- التكهف "Cavitation"

التكهف يتولد بشكل عشوائى "random"، مصحوبة بضوضاء وإهتزازات عالية التردد " high frequency". وغالباً ما يظهر رابية "hump" عالية فى بصمة الإهتزازات.



تحدث ظاهرة التكهف "Cavitation" عندما ينخفض ضغط السحب "suction pressure" للسائل فى ماسورة السحب للمضخة ويصل إلى ضغط التبخر "low inlet pressure" وبالتالى تتكون نتيجة لذلك فقاعات هوائية وهذه الفقاعات عندما تتعرض للضغط العالى للمضخة تنفجر وتسبب إهتزازات ميكانيكية عنيفة ينتج عنها (ضوضاء وإهتزاز المعدة وفقد فى الطاقة وتقليل الكفاءة وأخيراً تآكل الريش وسطح المواسير الداخلى).

١-٣-١- خطوات تكون ظاهرة التكهف

١- تبخر السائل عند ضغط منخفض.

٢- حركة البخار والفقاعات فى منطقة الضغط المرتفع للمضخة.

٣- إنفجار الفقاعات نتيجة التعرض لضغط مرتفع.

٤- تصاعد طاقة نتيجة الإنفجار الحادث للفقاعات.

١-٣-٢- العوامل التى تسبب التكهف

١- إنخفاض الضغط الجوى الناتج من الإرتفاع عن سطح الأرض.

٢- إرتفاع درجة حرارة المائع المضغوط.

٣- زيادة السرعة عند ماسورة السحب للمضخة وبالتالى يقل الضغط.

٤- اللزوجة.

٥- إنحراف مسار السريان للمائع فى المواسير بسبب وجود عائق بالمواسير تسبب فى تغيير الإتجاه.

١-٣-٣- الأماكن التى يمكن أن يحدث بها التكهف

١- ماسورة سحب المضخة.

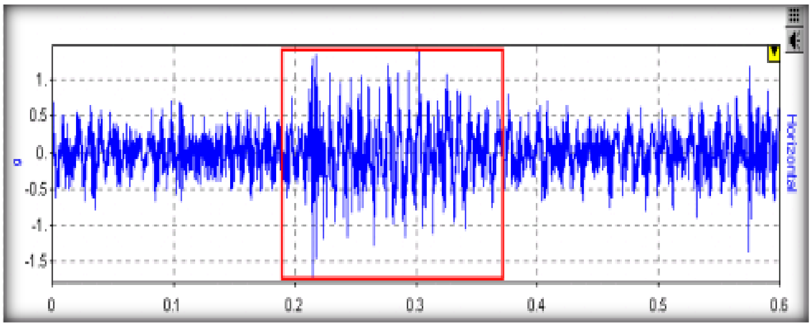
٢- المواسير مختلفة المقطع.

١-٣-٤- علاج التكهف

١- تكبير مقطع ماسورة السحب.

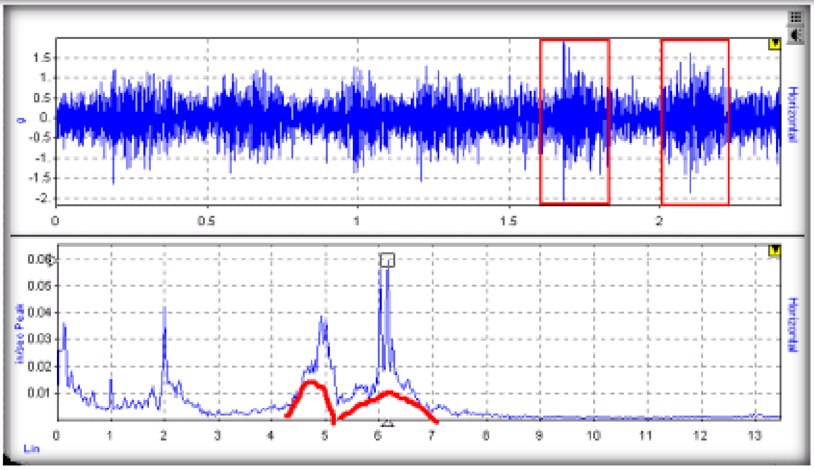
٢- رفع مستوى السائل لماسورة السحب.

الشكل الموجى "time waveform" هى أداة مفيدة وجيدة للتحليل، ومن المعروف أن الترددات العالية "high frequency" ذات الطاقة العالية غالباً ما تكون ظاهرة بوضوح – ولكن غالباً ما تحتاج البيانات لوقت إضافى (أي سجل "record" أطول) أكبر من القياسات الروتينية.

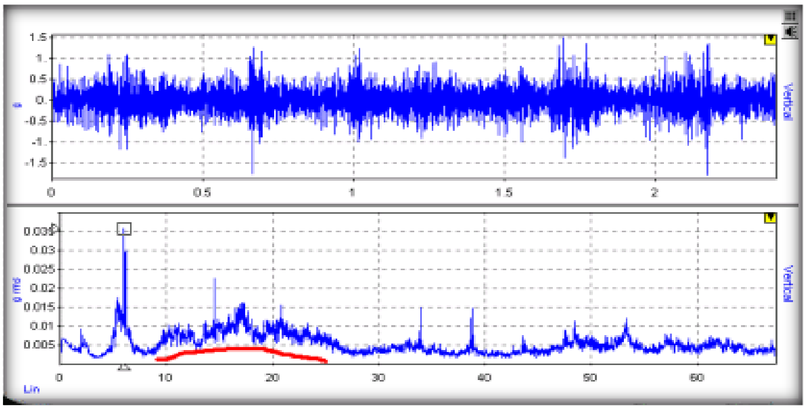


مثال:- محرك كهربائي ٢٠ حصان يقود طلمبة طرد مركزي "centrifugal pump" تتكون من حدافة ٦ ريش "impeller vanes". والماكينة جزء من نظام التبخير لغلى الماء في مصنع للورق "paper mill".

إذا نظرنا إلى بيانات الطلمبة فى الإتجاه الأفقى "horizontal direction"، عند دقة وضوح ٣٢٠٠٠ خط "line resolution"، سوف ترى ظهور طاقة عالية فى الشكل الموجى، وبعض المطبات "humps" فى بصمة الإهتزازات. ومن الممكن رؤية بداية إثارة للرنين.



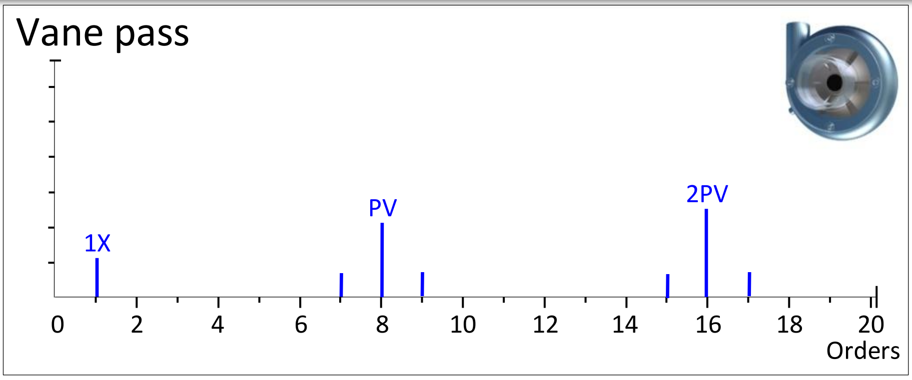
وإذا نظرنا إلى بصمة الإهتزازات بالجيز (G's) فى الإتجاه الرأسى (للتأكيد على الترددات العالية)، يمكننا أن نرى علامات للتكهف "cavitation" أكثر وضوحاً.



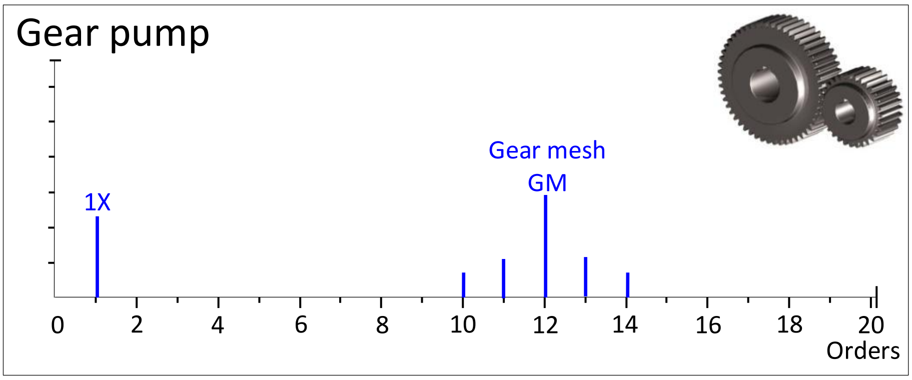
٢- الطلمبات "Pumps":- تشخيص المشاكل المرتبطة بالطلمبات "Diagnosing problems"

هناك العديد من أنواع الطلمبات شائعة الإستخدام وتختلف الاهتزازات لهم على نطاق واسع. عند مراقبة إهتزاز الطلمبة، فمن المهم أن تكون ظروف التشغيل ثابتة من قياس إلى القياس الذى يليه لضمان تناسق أشكال البصمة "vibration patterns". ضغط السحب "Suction pressure" وضغط التصريف "discharge pressure" والتكهف "cavitation" سوف تؤثر على شكل البصمة إلى حد كبير "vibration patterns".

طلمبات الطرد المركزى "Centrifugal pumps" يظهر بها دائماً تردد مشهور وهو تردد الريش "Vane pass" وهو عبارة عن عدد ريش الحدافة "impeller vanes" مضروباً فى سرعة عمود الدوران "RPM". وإذا زادت السعة بشكل كبير هذا يعنى وجود مشكلة داخلية "internal problem" مثل تآكل "erosion" الحدافة "impeller" أو مشكلة السريان "flow" أو ربما عدم السنترة "misalignment". وتوافقات "Harmonics" تردد الريش شائعة أيضاً فى مثل هذه الطلمبات.

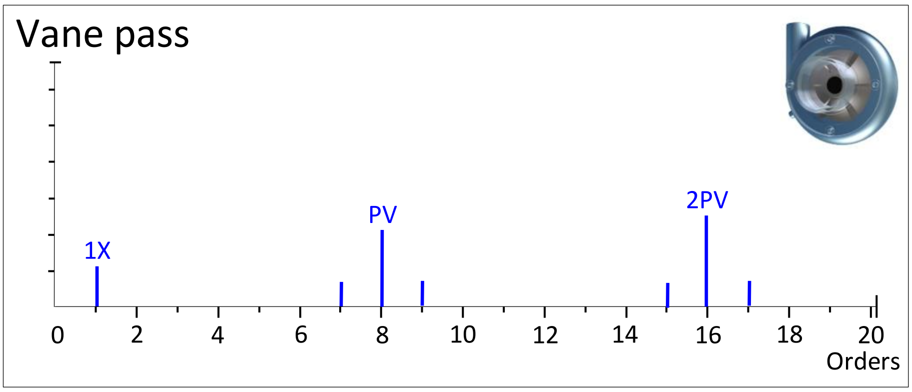


والطلمبات الترسية "Gear pumps" شائعة الإستخدام فى ضخ زيوت التشحيم "lube oil"، وعادةً ما تحدث إهتزازات قوية عند تردد تعشيق التروس "tooth mesh frequency"، ويتم حسابه حاصل ضرب عدد الأسنان للترس "number of teeth" فى سرعة الدوران.



وتردد تعشيق التروس "tooth mesh" يعتمد أساساً على الضغط الناتج من الطلمبة " output pressure". وإذا زادت سعة تردد تعشيق التروس "tooth mesh" بشكل كبير والتوافقات "harmonics" والترددات الجانبية "sidebands" فى بصمة الإهتزازات هذا يدل على وجود شرخ "cracked" أو أسنان مكسورة "damaged tooth".

معظم أنواع الطلمبات تظهر قمة فى بصمة الإهتزازات "spectrum" عند تردد عدد من العناصر المتحركة "rotating elements" (الريش، والتروس، إلخ..) مضروباً فى سرعة دوران الطلمبة. وإذا زادت السعة وظهور التوافقات والترددات الجانبية (X١) فى بصمة الإهتزازات معنى ذلك وجود تآكل "wear" أو وجود مشكلة هيدروليك/سريان "hydraulic/flow".



٣- المراوح "Fans":- تشخيص المشاكل المرتبطة بالمراوح "Diagnosing problems"

تصمم المراوح لتحريك الهواء ضد ضغط منخفض والضغط والكثافة والحرارة واللزوجة والرطوبة كل هذه العوامل تؤثر على تصميم وأداء المراوح.

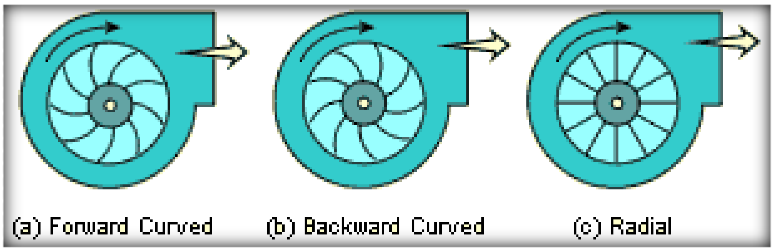
يوجد نوعين أساسين من المراوح وهما مراوح السريان المحورى "axial flow" ومراوح الطرد المركزى "centrifugal". ويمكن تثبيت المراوح بطريقتين إما "center hung" وفيها تكون المروحة مثبتة فى الوسط بين بليتين أو "cantilever" وفيها تثبت المروحة خارج البليتين.

ويوجد ثلاثة أنواع من ريش مراوح الطرد المركزى "centrifugal":-

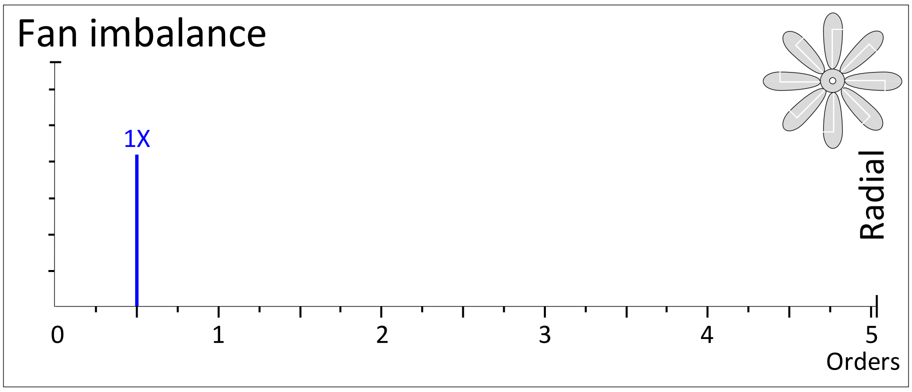
١- ريش منحناها يميل للأمام "forward curved blade" وتميل هذه الريشة بزاوية أقل من ٩٠ درجة على إتجاه الدوران وتزيد كفاءتها على ٧٥%.

٢- ريش منحناها يميل للخلف "backward curved blade" وتميل هذه الريشة بزاوية أكبر من ٩٠ درجه على إتجاه الدوران وكفاءتها حوالى ٨٠%.

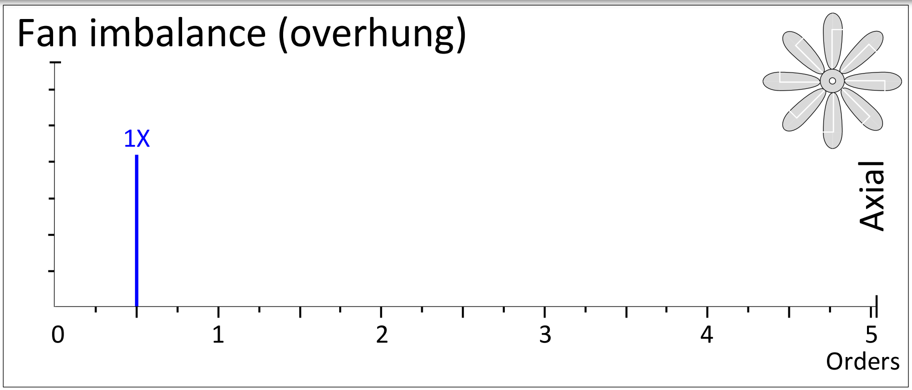
٣- ريش مركزية "radial blade" وحافة هذه الريشة مركزية وتعمل زاوية تساوى تقريبا ٩٠ درجه مع إتجاه الدوران وكفاءتها حوالى ٧٥%.



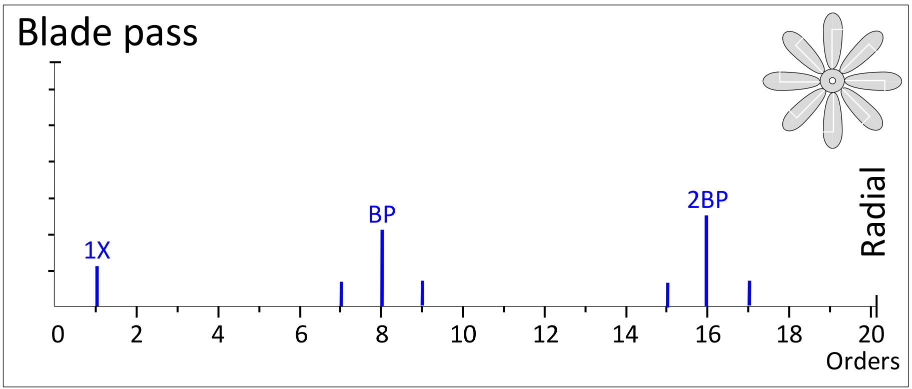
وريش المراوح عرضة لتراكمات متفاوتة "uneven buildup" من الأتربة وغيرها، وخصوصاً عندما تقتضى ظروف التشغيل التعامل مع غازات أو هواء محملة بالجزيئات. وهذا يسبب عدم إتزان "imbalance" المروحة وينبغى تصليح عدم الإتزان عندما يتم تشخيصه فى أقرب وقت.



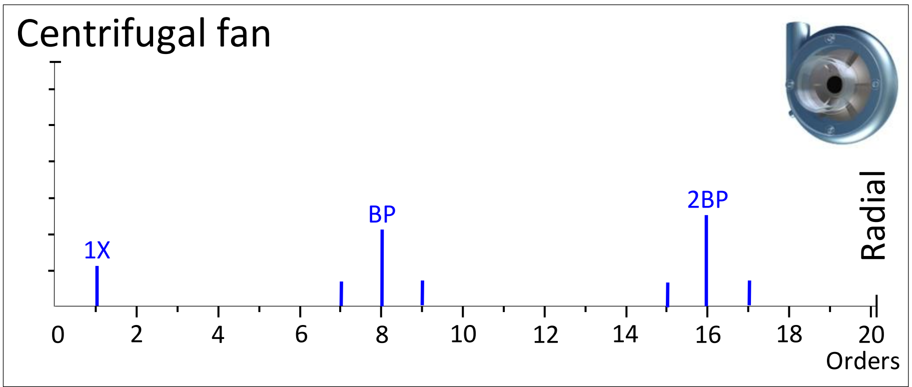
فى المروحة المتدلية "overhung" (المروحة مثبتة خارج البليتين) وهذا النوع شائع جداً فى الإستخدام يكون مستوى الإهتزازات لتردد سرعة الدوران (١X) مرتفعة فى الإتجاه المحورى.



إذا كان أى من ريش المروحة مشوهة "deformed" أو مشروخة "cracked" أو مكسورة "broken" من الممكن ظهور ترددات جانبية "sidebands" (X١) فى بصمة الإهتزازات حول تردد الريش "blade pass frequency". وإذا وجدت مشكلة خلوصات "clearance problem" تظهر أيضاً الترددات التوافقية لتردد الريش "BP" "blade pass".



يوجد مشكلة شائعة فى مراوح الطرد المركزى "centrifugal fans" وهى التوزيع غير المتساوى لسرعة إمدادات الهواء خلال فتحة الدخل، وهذا يسبب إرتفاع مستوى الإهتزازات لتردد الريش "blade pass". وإذا كانت المروحة غير متزنة "out of balance" وكانت متدلية "overhung" (المروحة مثبتة خارج البليتين) سوف يحدث إهتزازات عالية عند تردد سرعة الدوران (X١) فى الإتجاه المحورى بالإضافة إلى إتجاه الراديال "radial". وأى خلل يحدث للريش يسبب أيضاً ترددات جانبية "sidebands" (X١) فى بصمة الإهتزازات حول تردد الريش "blade pass".



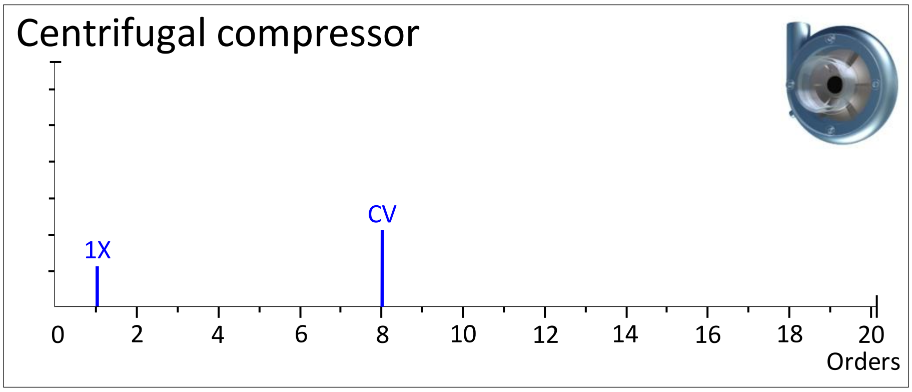
تأكد دائماً عند قياس الإهتزازات أنك تكرر نفس ظروف التشغيل حيث أن أى تغير فى سريان الهواء سوف يؤثر بشكل كبير على قراءات الإهتزازات (ويفضل عمل القياسات عندما يكون الدامبر مفتوح بالكامل "dampers fully open" وبالتالى لا يقيد سريان الهواء).

٤- الضواغط "Compressors"

ضواغط الطرد المركزى "Centrifugal compressors"

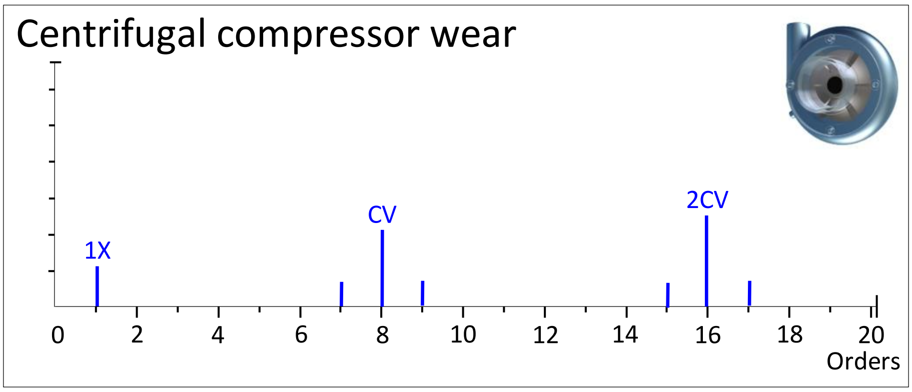
ضواغط الطرد المركزى ينتج عنها بصمة إهتزازات مماثلة لمراوح الطرد المركزى "centrifugal fans" حيث أن تردد الريش "blade pass frequency" يكون مهيمناً "dominant".

CV = Number of vanes x shaft RPM



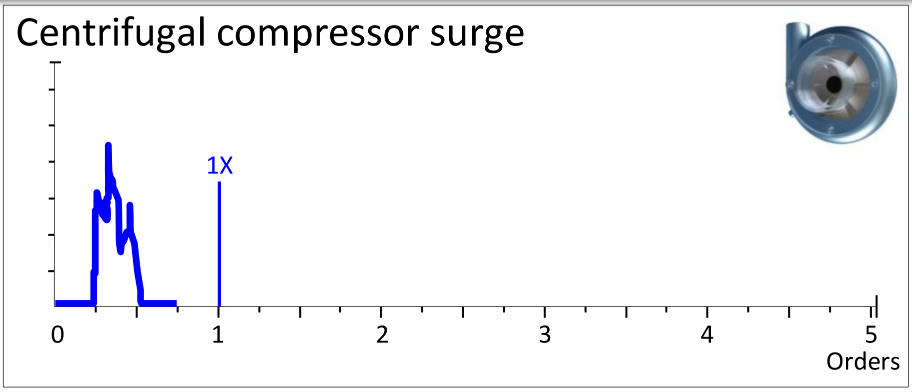
٤-١- التآكل فى ضواغط الطرد المركزى "Centrifugal compressor wear"

تلف أو تآكل الريش "Damaged or eroded vanes" سوف يتسبب فى زيادة مستوى الإهتزازات عند تردد الريش "blade pass frequency"، وعادةً ما يحدث ترددات جانبية "sidebands" (X١) فى بصمة الإهتزازات حول هذا التردد.



٤-٢- مشكلة ضغط السريان فى ضاغط الطرد المركزى "Centrifugal compressor surge"

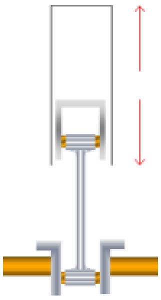
زيادة مفاجئة وكبيرة فى ضغط السريان "Compressor surge" فى منفذ إخراج الضاغط "output port" حيث أنها مشكلة ديناميكية السوائل "fluid dynamic" وتسبب إهتزازات عند أقل من تردد سرعة الدوران(X١).



٥- الماكينات الترددية "Reciprocating machines"

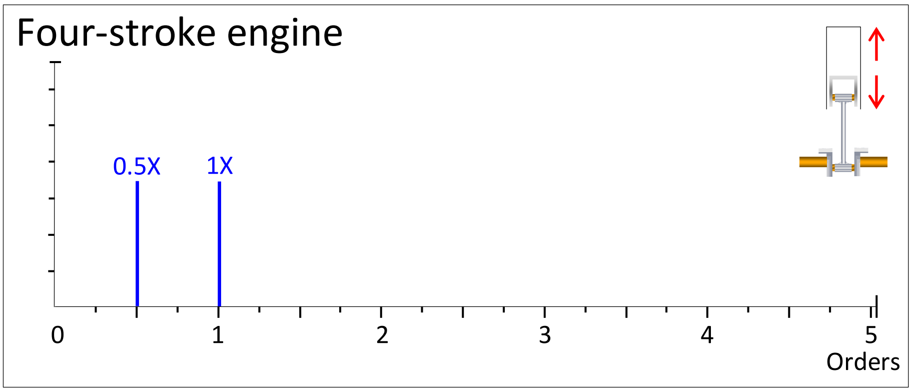
الأنواع الأكثر شيوعاً للماكينات الترددية هى الطلمبات المكبسية "piston pumps" والضواغط "compressors" ومحركات الإحتراق الداخلى "internal combustion engines".

إذا نظرت بعناية إلى حركة المكبس "piston"، يمكنك أن ترى أن هناك حركتين منفصلتين، وبالتالى غالباً ما سوف ترى فى بصمة الإهتزازات قمة "peak" عند ضعف سرعة الدوران (X٢).

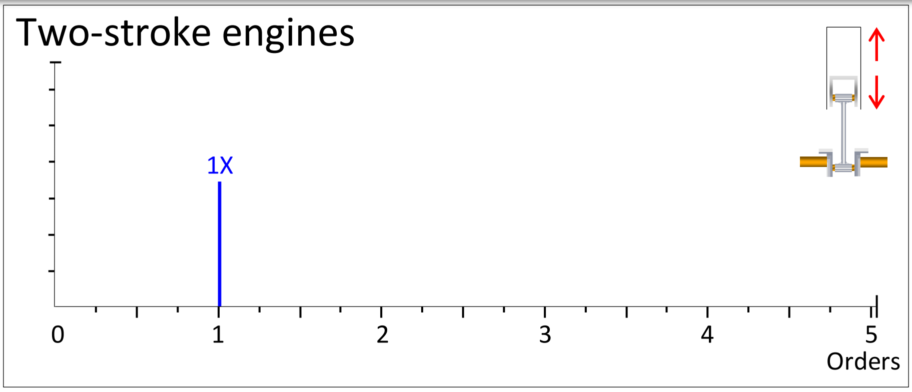


٥-١- المحركات الترددية "Reciprocating engine"

إذا كان لديك محرك رباعي الأشواط "four-stroke engine"، فإن المحرك يحترق " engine fires" عند دوران الآخرين، الأمر الذي سيؤدي إلى وجود قمة قوية فى بصمة الإهتزازات عند نصف سرعة الدوران (X٠.٥).

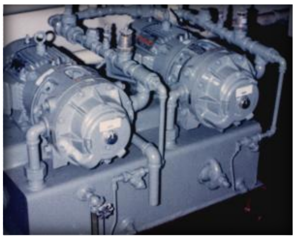


فى حالة المحرك ثنائى الأشواط "two-stroke engine"، مثل العديد من الديزيل، فإن المحرك يحترق عند كل مشوار، وبالتالى سوف ترى فى بصمة الإهتزازات قمة "peak" سرعة الدوران (X١).



من الشائع أن مستوى الاهتزاز على الماكينات الترددية "reciprocating machinery" تكون عالية جداً، وبالتالى ينبغى أن لا ننزعج من ذلك. ومن الضروري عند عمل مقارنة لمستويات الإهتزازات مع القراءات السابقة أن تتم المقارنة فى نفس ظروف التشغيل السابقة، ومن المعروف أن أى تغير طارئ على الحمل في محركات الديزل على سبيل المثال، يمكن أن ينتج عنها أنماط مختلفة تماماً فى بصمة الإهتزازات.

الطلمبات المكبسية "piston pumps" متغيرة الإزاحة "Variable displacement" هى أكثر نعومة "much smoother" من الضواغط ويمكن تحليل إهتزازاتها بشكل جيد. إذا وجدت التوافقات الخاصة بمعدل المكبس "piston rate" بمستويات عالية "significant levels" فى بصمة الإهتزازات، يدل ذلك عادةً على وجود مشكلة فى ربط محرك المكبس " piston drive linkage problem".



القسم الرابع:– توربينات الغاز والبخار "Steam and Gas Turbines"

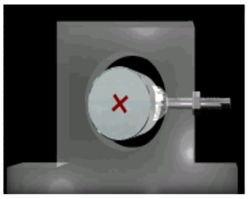
١– تشخيص توربينات الغاز والبخار "Diagnosing Steam and Gas Turbines"

ليس هناك فرق فى تحليل إهتزازات توربينات البخار والغاز، ولكن توربينات الغاز لها غرفة إحتراق "combustion chamber" التى ينتج عنها نطاق عريض من الضوضاء "broadband noise" فى الإهتزازات.

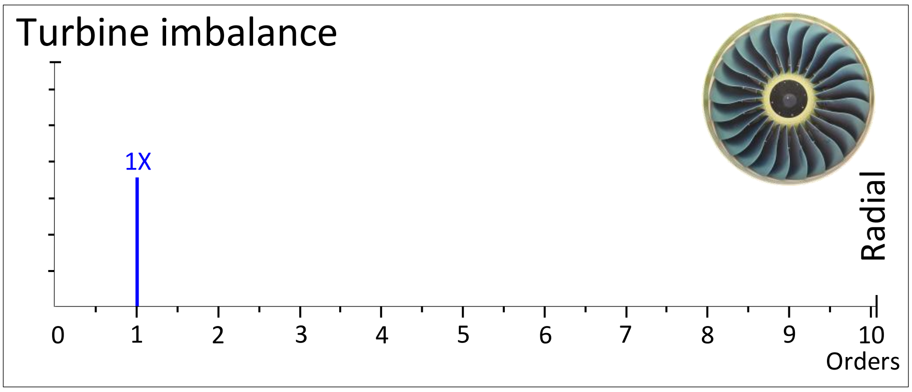


يتم قياس الإهتزازات على أسطح "casing" رولمان بللى التوربينات "turbine bearings"، ومحول القياس "transducer" الأكثر شيوعاً هو الإزاحة "displacement" (مجس بروكسمتى "proximity probe" وهوغير متصل "non-contact" لقياس التيارات الدوامية).

ويستخدم مجس بروكسمتى "proximity probe" على نطاق واسع في قياس المسافة الإستاتيكية والديناميكية بين الهدف واللاقط. ويستخدم لقياس إهتزازات الأعمدة "shaft vibration" وموضع العمود المحورى "axial" والراديال "radial" ومقدار التمدد بين السطح والعمود. بالإضافة إلى تشخيص عيوب الماكينات مثل الإكتشاف المبكر لشروخ العمود "shaft crack" وعدم سنترة العمود مع سطح الماكينات وعدم إتزان الروتور وتآكل رولمان البللى.

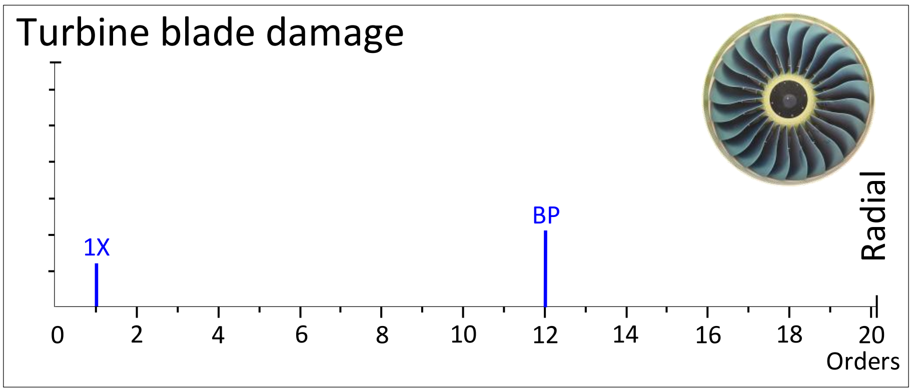


بإستخدام إشارة الإزاحة "displacement signal" يمكن تحليل البصمة العادية والشكل الموجى. يمكنك النظر إلى إرتفاع إهتزازات سرعة الدوران (high 1X) وكذلك ضعف تردد سرعة الدوران (X٢) لمعرفة مشاكل عدم الإتزان "imbalance" وعدم السنترة "misalignment" تبعاً لقواعد "rules" تحليل الإهتزازات.



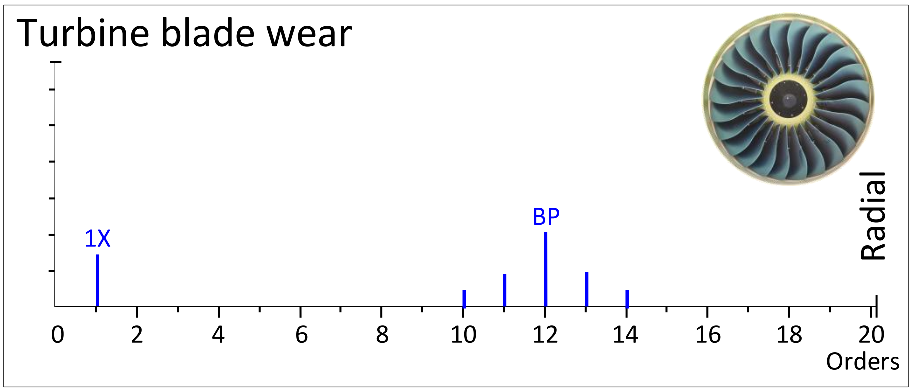
بصمة الإهتزازات الخاصة بالتوربينات غالباً ما تظهر قمة قوية "strong peak" عند تردد الريش (عدد ريش التوربينة مضروباً فى سرعة دوران العمود "RPM").

مقدار الإهتزازات يعتمد على الهندسة الداخلية "internal geometry". إذا تغيرت الهندسة الداخلية بسبب الشروخ "cracked" والتشوه "warped" أو نقر الريش "pitted blade" فإن مستوى الإهتزازات الخاصة بتردد الريش "blade pass peak" سوف يزداد.



ونظراً للعدد الكبيرمن الريش "large number of blades" وغالباً ما يكون هناك مراحل متعددة من ريش المروحة. فمن الشائع تبعاً لذلك أن تكون الترددات عالية نسبياً "high frequency".

إذا كانت ريش التوربينات ليس بها تآكل منتظم "wear uniformly"، أو إذا كان هناك تلف لجزء من العضو الدوار"rotor"، مثل كسر إحدى الريش "broken blade" فإن تردد الريش " blade pass" سوف يكون "modulated" بسرعة الدوران العمود "shaft RPM" أو بعدد الفتحات "nozzles" مضروبة فى سرعة الدوران "RPM" مما يتسبب فى وجود ترددات جانبية "sidebands" فى بصمة الإهتزازات.



٢- مشاكل سبائك كراسى التحميل "Journal bearing Problems"

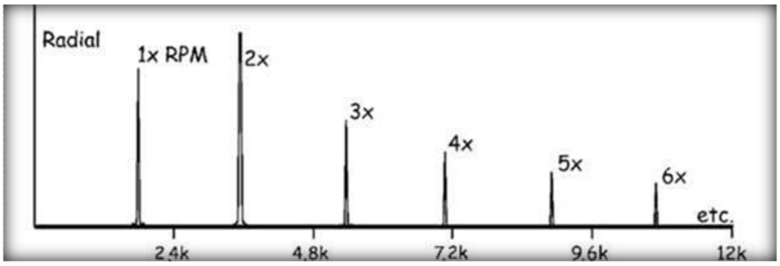
لا تستخدم العناصر المتدحرجة فى سبائك كراسى التحميل ويحمل العمود على طبقات من زيوت التشحيم "layer of lubricating oil" داخل تجويفات الكرسى "bearing bore".

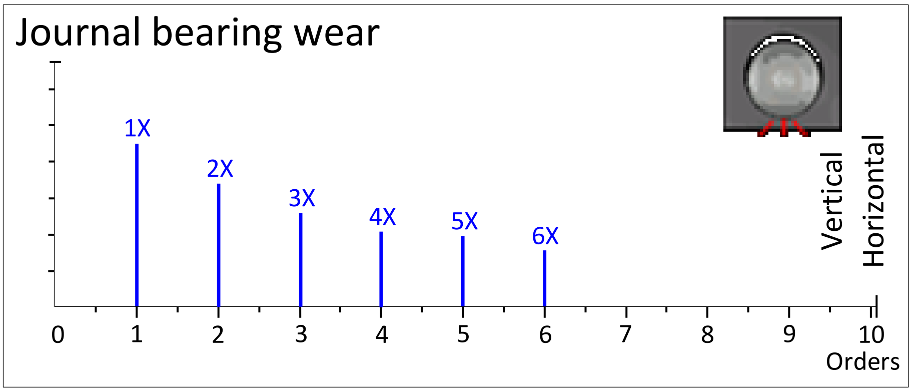
والزيت إما مغلق داخل الكرسى "sealed"، أو يتم تغذية الكرسى بالجاذبية "gravity fed" أوبالضخ "pumped in" أى بتغذية الضغط "pressure fed".

ويوجد مشاكل مثل التيارات الدوامية فى الزيت "oil whirl" وكذلك "oil whip" ويتم أخذهما فى الإعتبار عند تحليل بيانات التوربينات.

٢-١- مشاكل التآكل/الخلوصات "Wear/Clearance" فى سبائك كراسى التحميل

عند وجود مشكلة خلوصات "clearance" فى جلب "sleeve" أو سبائك كراسى التحميل، فإن بصمة الإهتزازات تظهر خصائص مشابه جداً للتفكك الدورانى "rotating looseness". حيث يوجد توافقات قوية "strong harmonics" لسرعة دوران العمود "shaft speed". وفى كل الحالات مستوى الإهتزازات فى المحور الرأسى "vertical axis" أعلى من مستوى الإهتزازات فى الإتجاه الأفقى "horizontal". وإذا إرتفعت الإهتزازات فى الإتجاه المحورى "axial reading" عند إحدى الأطراف "one end" عن الطرف الآخر دل ذلك على إنهيار الكرسى.





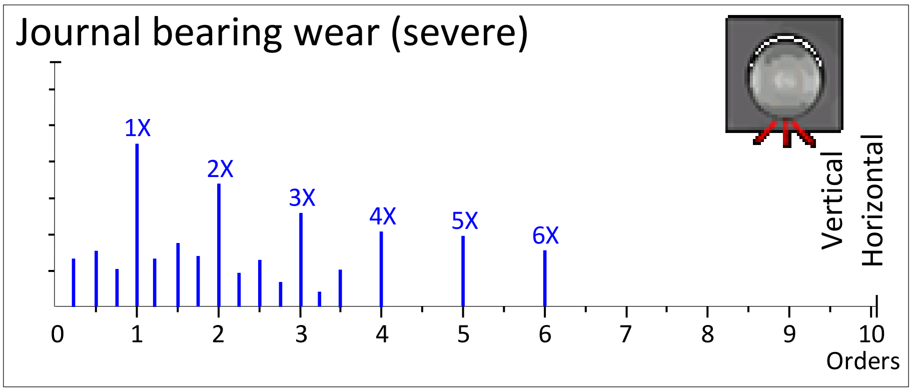
أعراض سبائك كراسى التحميل "Sleeve Bearing Looseness Symptoms"

١- إرتفاع مستوى الإهتزازات فى إتجاه الراديال "High radial vibration" عند سرعة الدوران (X١). العديد من توافقات سرعة الدوران "rpm" مثل تفكك رولمان البللى. وفى الحالات الشديدة "severe cases" تظهر قمم الإهتزازات عند توافقات ١/٢ سرعة الدوران (rpmX٠,٥ ، rpmX١,٥ ، إلخ).

٢- إذا وجد عدم إتزان أو عدم سنترة غير مؤثر "minor" فإن زيادة خلوصات كراسى السبائك "excessive bearing clearances" تسبب إرتفاع مستوى الإهتزازات.

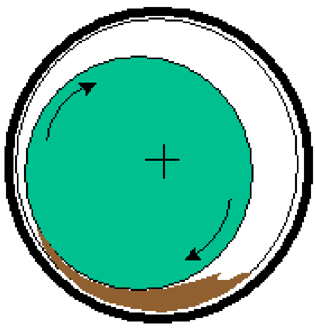
٣- وفى الحالات الأكثر شدة تظهر ترددات عند ٢/١ بل وحتى عند ٣/١ سرعة الدوران "order" فى بصمة الإهتزازات.

٤- المراحل المتأخرة من تآكل كراسى السبائك يعطى عائلة كبيرة من التوافقات "harmonics" لسرعة الدوران "running speed" قد تصل إلي ١٠ أو ٢٠ مرة كما ببصمة الإهتزازات الآتية.

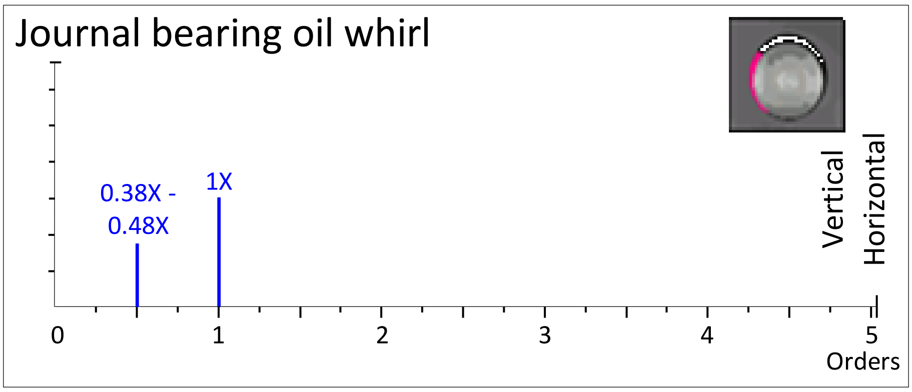


تحليل الزيت "Oil analysis" يستخدم فى مراقبة خصائص الزيت "oil properties" والشوائب "contaminants" وتآكل المعادن "wear metals" وهى أفضل أداه تنبؤية تستخدم فى أنظمة سبائك كراسى التحميل.

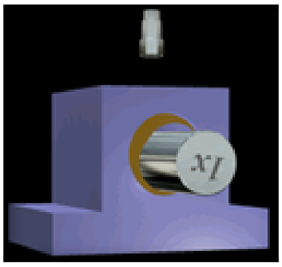
٢-٢- عدم إستقرار دوامة الزيت "Oil Whirl"



عدم إستقرار دوامة الزيت "Oil Whirl Instability" هى الحالة التى تحدث إهتزازات قوية "strong vibration" محصورة بين ٠,٤٢ إلي ٠,٤٨RPMx. ولا يمكن ظهورها فى تمام "precisely" ٠,٥X، ولكن هى دائماً أقل قليلاً في التردد.



دوامة الزيت، مشكلة غير عادية وتحدث عند الزيادة المفرطة للخلوصات " excessive clearance" وحمل خفيف فى إتجاه الراديال "light radial loading" مما ينتج عنه إنشاء طبقة خفيفة من الزيت "oil film" يتم الاحتفاظ بها في مكانها نتيجة دوران العمود وإجبار الزيت إلي الهجرة "migrate" في شتى أنحاء كرسى التحميل. وإحتكاك العمود مع الزيت المحشور يدفع العمود حول بيت الكرسى "around the housing".



من الممكن أن يتسبب الزيت "oil" فى عدم تدعيم العمود "support the shaft"، أو يصبح غير مستقر عندما يكون تردد الدوامة "whirl frequency" يتزامن مع "coincides" التردد الطبيعى للعمود "rotor natural frequency". وتتأثر دوامة الزيت بتغير لزوجة الزيت "oil viscosity" وضغط الزيت "lube pressure" وكذلك الأحمال الخارجية "external pre-loads".

دوامة الزيت هى حالة خطيرة وتحتاج إلى تصحيح إذا وجدت، لأنها يمكن أن تتدهور بسرعة إلي أن تصل إلى حالة خطيرة ويحدث عندها إتصال المعدن بالمعدن "metal-to-metal contact" فى كرسى التحميل.

أعراض دوامة الزيت "Oil Whirl"

إهتزازات عالية فى إتجاه الراديال محصورة بين (٠,٤٢ – ٠,٤٨) RPM X.

٢-٣- خفقان الزيت "Oil Whip"

خفقان الزيت "Oil Whip" هى حالة مدمرة للغاية وتحدث أحياناً فى التربينات الكبيرة متعددة الحركة "multi-rotor" والتى يتم تشغيلها بسرعة أكبر من السرعة الحرجة "critical speeds". وخفقان الزيت "Oil Whip" يحدث عندما يتطابق "matches" عنصر الإثارة "excitation component" لدوامة الزيت "Oil Whirl" مع التردد الطبيعى للعمود "shaft natural frequency". ونتيجة حدوث الرنين يرتفع مستوى الإهزازات بدرجة كبيرة.

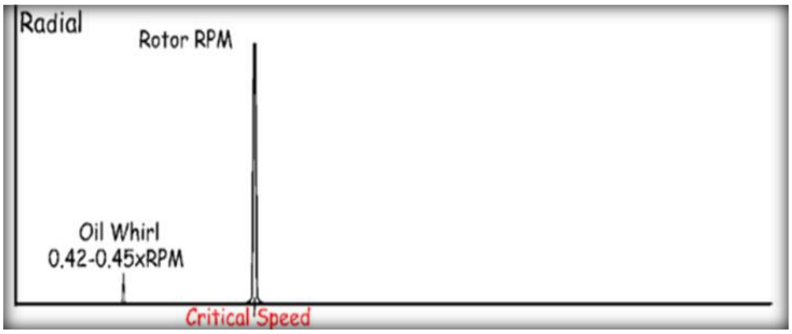


خفقان الزيت "Oil Whip" يحدث أحياناً عند بدء تشغيل الماكينات طويلة الأعمدة "long shafts". حيث أن التردد الطبيعي جارى إثارته ويتحكم فى الماكينة، وكلما زادت السرعة فإن تردد الإهتزازات لا يتغير. وهذا على النقيض من دوامة الزيت البسيطة "Oil Whirl" الذى ترددها يتغير بتغير سرعة العمود.

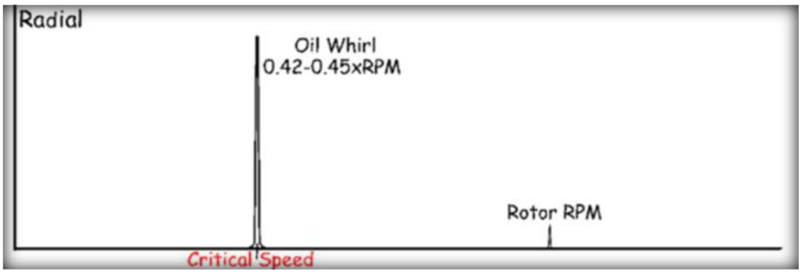
الحل الأمثل لمشاكل خفقان الزيت "Oil Whip" ودوامة الزيت "Oil Whirl" هي أن تكون خلوصات كراسى التحميل صغيرة ومناسبة وبالتالى تكون ملائمة للأحمال فى إتجاه الراديال " light radial loading". بالإضافة إلي ذلك من المهم جداً أن تمر التوربينات الكبيرة أثناء تشغيلها بالترددات الحرجة بشكل سريع لمنع تكون خفقان الزيت "Oil Whip".

كيفية حدوث خفقان الزيت "Oil Whip" من خلال بصمة الإهتزازات

البصمة الآتية تظهر كل من دوامة الزيت والسرعة الحرجة الأولى للروتور.



ونتيجة التزايد المستمر لسرعة دوران الروتور فى بداية الدوران فإن سرعته الحرجة الأولى تتطابق مع تردد دوامة الزيت (معنى ذلك أن سرعته الحرجة الأولى تساوى حوالى ٠,٤٥ X سرعة الدوران الحالية "RPM") كما فى البصمة التالية.



تبقى الاهتزازات العالية المدمرة "Destructively High Vibration" عند أول تردد حرج للروتور "Rotor's 1st Critical Speed" حتى مع إستمرار زيادة سرعة دوران الروتور.

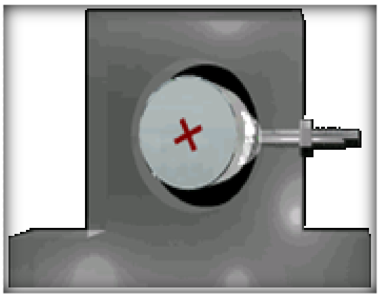


أعراض خفقان الزيت "Oil Whip"

- حدوث دوامة الزيت "Oil Whirl" نتيجة شدة "excessive" خلوصات كراسى التحميل.
- تظهر المشكلة عند دوران الروتور فى مدى (٢,١ إلى ٢,٤) X السرعة الحرجة " critical speed" (معنى ذلك عند أكثر من ضعف السرعة الحرجة للروتور). وعند دوران الروتور بهذه السرعة تكون السرعة الحرجة الأولى للروتور محصورة بين (٠,٤٢ – ٠,٤٨) X RPM وهى المدى الخاص بدوامة الزيت "Oil Whirl".
- ظهور إهتزازات عالية عند السرعة الحرجة للروتور(وهذا يحدث عندما تكون الإهتزازات الناتجة بسبب حالة دوامة الزيت والتى تعمل على إثارة تردد الرنين للروتور).
- تبقى الاهتزازات العالية المدمرة "Destructively High Vibration" عند أول تردد حرج للروتور "Rotor's 1st Critical Speed" حتى مع إستمرار زيادة سرعة دوران الروتور.

٢-٤ رسم بيانى للأوربت "Orbit plots"

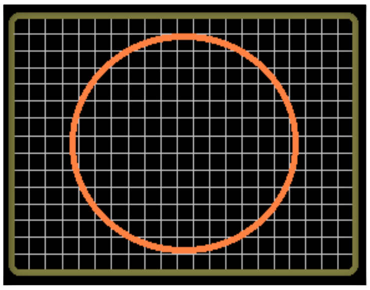
عرض الرسم البيانى للأوربت هو القياس الأكثر شيوعاً لتحليل إهتزازات التوربينات الكبيرة. يتم تثبيت إثنين من مجسات البروكسمتى "proximity probes" عند ٩٠ درجة من بعضهما البعض (متعامدان)، ويتم رسم الإشارتان فى "محورى x،y ". والرسم البيانى للأوربت "Orbit plots" يشير إلى حركة مركز العمود "shaft" داخل سبيكة كراسى التحميل "Journal bearings".



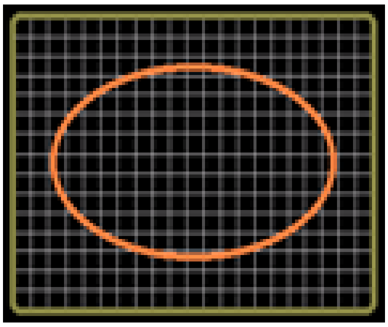
والأمثلة القليلة الآتية تعرض نماذج مثالية للأخطاء الشائعة بإستخدام الرسم البيانى للأوربت " orbit displays".

مشكلة عدم الإتزان "Imbalance" ينتج عنه مدار دائرى "circular orbit". وإذا كانت الصلابة "stiffness" متساوية فى الإتجاه الأفقى والرأسى سوف نحصل على دائرة كاملة "perfect circle".

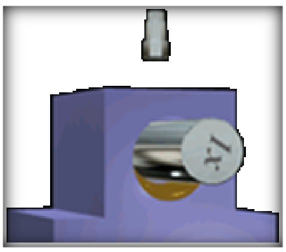
وفى معظم الحالات المدار "orbit" سوف يكون مائل قليلاً إلى الشكل البيضاوى " slightly elliptical".



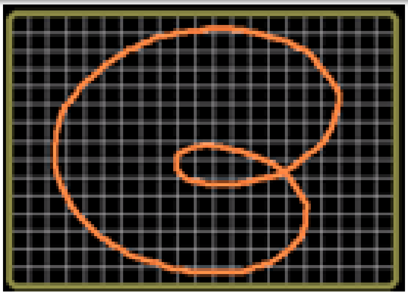
مشكلة عدم السنترة "Misalignment" تجعل شكل الرسم البيانى للأوربت "orbit displays" أكثر بيضاوية "more elliptical". وتغير زاوية الطور "phase" وتردد X٢ يجعل الشكل بيضاوى "elliptical shape" – ولكن تذكر دائماً أن هناك مصادر أخرى محتملة للترددات العالية " higher frequencies".



التيارات الدوامية للزيت "Oil whirl"، يمكن أيضاً كشفها من خلال عرض المدار " orbit displays". ونظراً لأننا نتوقع تردد حوالى ٤٢٪ – ٤٨٪ من سرعة دوران العمود " shaft speed"، وسوف نرى عقدة أو حلقة صغيرة "loops" ضمن عقدة أو حلقة أكبر.



نصف تردد سرعة الدوران "Half-order" تتولد نتيجة إحتكاك العمود "shaft rubs" أو التفكك "looseness" وينتج عنها أيضاً حلقة ثانية "second loop"، ولكن الحلقة الثانية "second loop" الخاصة بدوامة الزيت "oil whirl" سوف تظهر وتتحرك حول المدار " move around the orbit"، ولكن الحلقة الثانية "second loop" للإحتكاك "shaft rubs" والتفكك "looseness" تبقى ثابتة "will remain stationary".



يوجد العديد من المشاكل التى يمكن إكتشافها بإستخدام الرسم البيانى للأوربت "orbit displays"، بما فى ذلك الإحتكاك "shaft rubs" والتفكك "looseness" والرنين "resonances" (أثناء بداية التشغيل "run-ups").

القسم الخامس:– المحركات الكهربائية "Electric motors"

١– تشخيص الأعطال المرتبطة بالمحركات الكهربائية " Diagnosing faults associated with "electric motors"

سنلقى الضوء على الأعطال المرتبطة بكل من المحركات الكهربائية المتزامنة " AC synchronous" والحثية "AC induction" وكذلك محركات التيار المستمر "DC motors". وبطبيعة الحال المحركات الكهربية تعانى من عدم الإتزان وعدم السنترة كغيرها من الماكينات الدوارة. وسوف ندرس مصادر الإهتزازات فى المحركات الكهربائية.

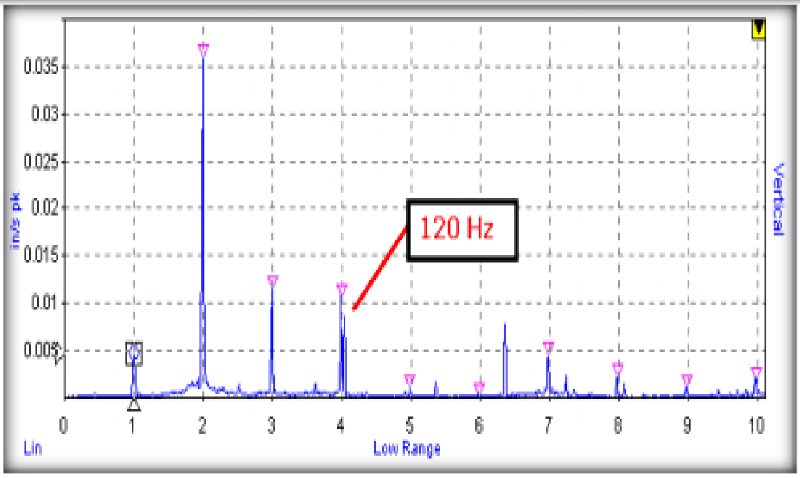


هناك نوعان من المحركات الكهربائية للتيار المتغير "AC electric motors" وهما المواتير المتزامنة والمواتير الحثية وكل منهما يتم تغذيته بواسطة مصدر كهربائى إما أحادى الطور(الوجه) "single phase" أو ثلاثى الطور "3-phase current". فى التطبيقات الصناعية المواتير ثلاثية الطور الأكثر شيوعاً، ويرجع ذلك بسبب زيادة كفائتها. ويضاف إلى ذلك أن المحركات الحثية هى أكثر إستعمالاً فى المصانع من المحركات المتزامنة.

يتكون المحرك من طرفين أحدهما ثابت ويسمى "stator" والآخر دوار ويسمى "rotor" وترتبط سرعة الدوران بقيمة تردد التيار في الدائرة. ويتكون العضو الدوار من شرائح من الحديد بدلاً من قلب من الحديد مصمته وذلك لتقليل تيار الفقد "eddy current loss" وزيادة الكفاءة. وما بين العضو الدوار والعضو الثابت مسافة من الهواء تسمى الثغرة الهوائية "air gap" وكلما قلت تلك المسافة بينهما قلت قيمة مقاومة الهواء.

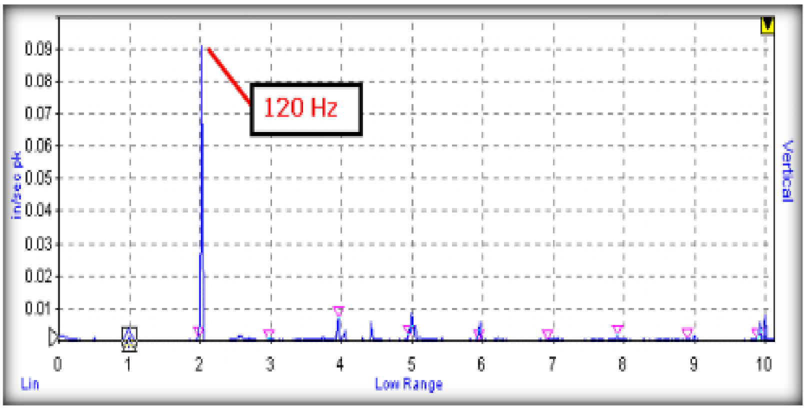
ضعف تردد التيار الكهربى "line frequency" (١٠٠ هرتز أو ١٢٠ هرتز) هو دائماً عنصر إهتزاز قابل للقياس فى المحرك الكهربائى "measurable vibration component". والتجاذب بين الجزء الثابت "stator" والجزء الدوار "rotor"، يتغير عند هذا المعدل، والحديد نفسه يتغير أبعاده قليلاً في وجود تغير للمجال المغناطيسي بسبب التشوهات المغناطيسية.

وتشوه المواد المغناطيسية "magnetic material" في وجود مجال مغناطيسي "magnetic field"، يسبب اهتزازات عند ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز في جميع الأجهزة الكهربائية مثل المحركات "motors" والمولدات "generators" والمحولات "transformers"، الخ.



في المحركات الكهربائية، يوجد تجاذب مغناطيسي بين الجزء الثابت والجزء المتحرك تختلف عند ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز. ويسبب ذلك أيضاً إهتزاز الجزء الثابت عند ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز.

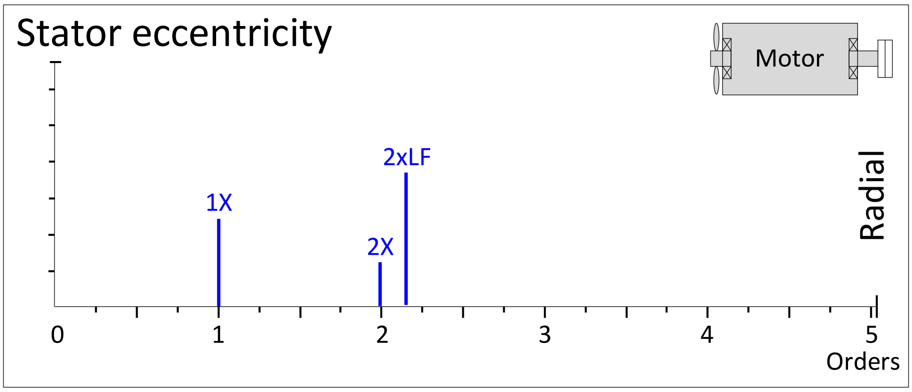
فى المحركات ثنائية القطب "two-pole" (سرعات متزامنة "synchronous speed" من ٣٠٠٠ أو ٣٦٠٠ سيكل/دقيقة)، يكون من الصعب أحياناً التمييز فى بصمة الإهتزازات بين قمة "peak" ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز (ضعف تردد الخط "line frequency") وقمة ضعف سرعة الدوران X٢. وللتمييز بينها يتم قياس بصمة الإهتزازات "collecting spectra" بدقة وضوح عالية " high resolution".



إحدى الإختبارات الهامة للتأكد من وجود قمة عند X٢ الخاصة بضعف سرعة الدوران بدلاً من ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز أى تحديد المشكلة كهربائية أو ميكانيكية أو هما معاً. وهو عمل القياسات أثناء تشغيل الموتور وقطع التيار الكهربى عن المحرك. فإذا إختفت الترددات ١٠٠ أو ١٢٠ هرتز فجأة (تكون المشكلة كهربائية) فى حين أن X٢ الخاصة بضعف سرعة الدوران تنخفض تدريجياً وببطئ تبعاً لإنخفاض سرعة المحرك "motor drops in speed" (تكون المشكلة ميكانيكية).

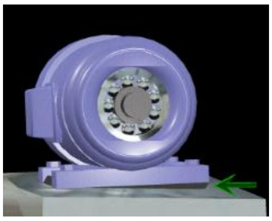
٢- مشاكل العضو الثابت "Stator problems"

مشكلة العضو الثابت (الإستاتور) سوف تظهر إهتزازات عالية عن ضعف تردد التيار الكهربى "line frequency" (١٠٠ أو ١٢٠ هرتز). الإنحراف المركزي للعضو الثابت "eccentricity" ينتج عنه ثغرة هوائية غير ثابتة "uneven stationary air gap" بين الروتور والإستاتور ينتج عنها مصدر إتجاهى جداً للإهتزازات "very directional source of vibration".



٣- السوفت فووت "Soft foot"

السوفت فوت "Soft foot" لأرجل المحرك الكهربى والقواعد المشوهة أو الملتوية " warped bases" من الممكن أن ينتج عنها إنحراف مركزى للإستاتور "eccentric stator". تغيير شدة الربط "Altering the tension" على مسامير أرجل المحرك "hold down bolts"، أو صيانة أساس الأرضية "foundation" تمكننا من حل هذه المشكلة.

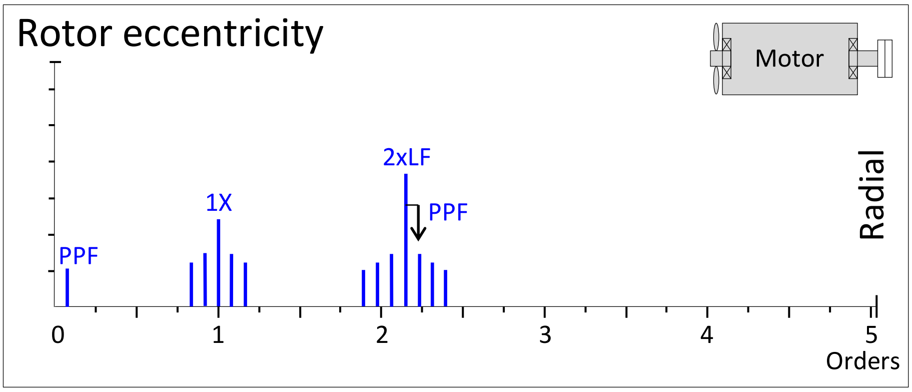


٤- عدم مركزية العضو المتحرك "Rotor eccentricity"

عدم مركزية الروتور ينتج عنه ثغرة هوائية دورانية متغيرة "rotating variable air gap" بين الروتور والإستاتور، والتى تولد مصدر متذبذب من الإهتزازات " pulsating source of vibration". ومرة أخرى سترى ضعف تردد التيار الكهربى (2 LF) وكذلك تردد سرعة الدوران (X١) محاطة بترددات جانبية "sidebands" لتردد تجاوز القطب (PPF) " pole pass frequency".

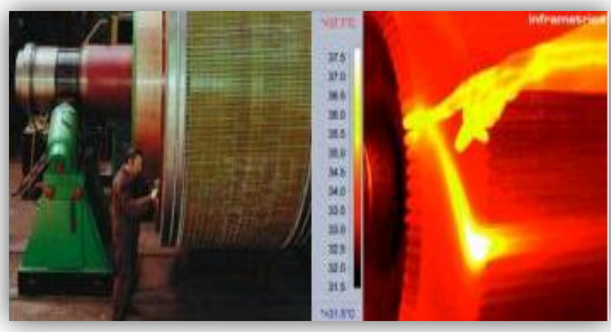
تردد تجاوز القطب (PPF) "pole pass frequency" يساوى التردد المنزلق "slip frequency" مضروباً فى عدد الأقطاب "number of poles". والتردد المنزلق "slip frequency" يساوى الفرق بين السرعة الفعلية للموتور "actual RPM" وسرعة التزامن "synchronous speed".

وبسبب أن التردد المنزلق "slip frequency" صغير جداً "quite small" وتردد تجاوز القطب "pole pass frequency" هو أيضاً صغير، ولذلك فنحن بحاجة إلى جمع بصمة الإهتزازات "collecting spectra" بدقة وضوح عالية "high resolution" لتحديد الترددات الجانبية "sidebands".



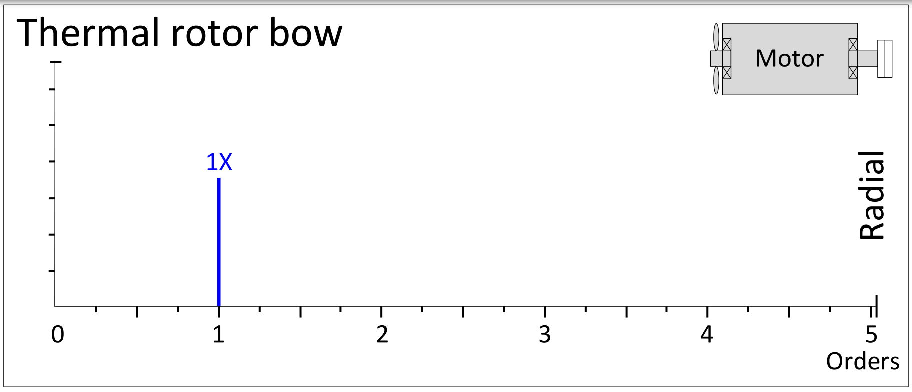
٥- مشاكل العضو الدوار "Rotor problems"

كسر "Broken" أو شرخ "cracked" أو تآكل "corroded" بارات الروتور "rotor bars" وهي مشكلة شائعة الحدوث الى حد كبير في المحركات الحثية "induction motors" وخاصة في المواتير التي يتكرر فيها الإيقاف والتشغيل تحت الحمل "under load". تيار بداية التشغيل "starting current" أكبر بكثير من تيار التشغيل "running current" مما يسبب إجهاداً "strain" على بارات الروتور "rotor bars" يكون نتيجتها إرتفاع درجة الحرارة.



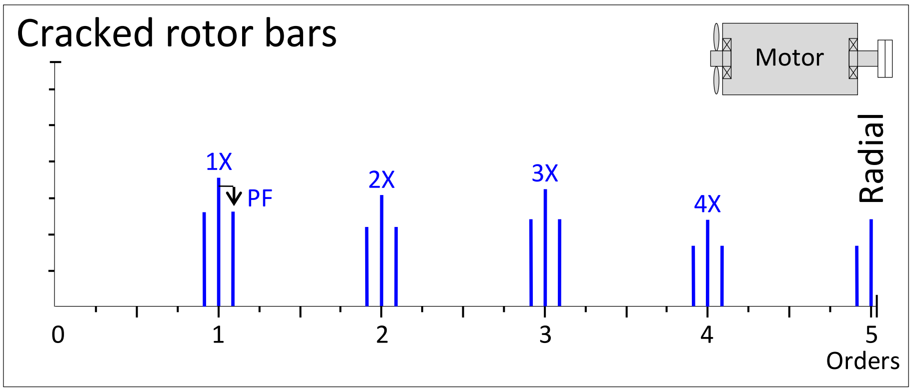
٦- إنحناء العضو الدوار بالحرارة "Thermal Rotor bow"

التسخين الغير متساوي "Uneven heating" للعضو الدوار "rotor" يسبب إلتوائه "warp" أو إنحنائه "bow" نتيجة عدم إتزان توزيع تيار بارات الروتور " unbalanced rotor bar current distribution"، الحرارة الموضعية "Local heating" من الممكن أن تكون شديدة جداً " so severe" في المحركات ومن الممكن أن البار المتسبب "offending bar" في المشكلة يذوب أو ينصهر ويستقر "lodge" في الثغرة الهوائية.



٧– شرخ بارات الروتور "Cracked rotor bars"

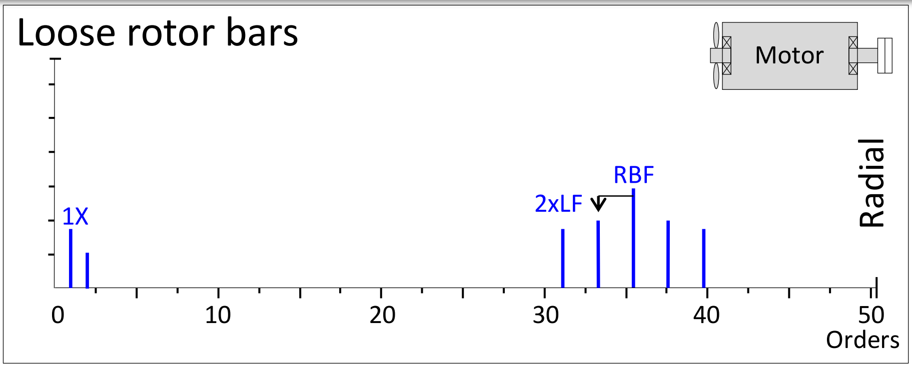
شرخ بارات الروتور ينتج عنه ترددات جانبية "sidebands" لتردد تجاوز القطب (PPF) "pole pass frequency" حول تردد سرعة الدوران X١ وتوافقاتها (X٢، X٣، وهلم جرا). وكثيراً ما ترى بصمة الإهتزازات مزدحمة بتوافقات X١ ويطوف حولها الترددات الجانبية (PPF).



المحرك الحثي "induction motor" الذى به عيب فى بارات الروتور "defective rotor bars" ينتج عنه إهتزازات بسعة تتغير ببطئ صعوداً أو هبوطاً عند ضعف التردد المنزلق للموتور " slip frequency". هذه الخاصية تسمى "beating" وتستطيع سماعها وكذلك قياسها. وسعة وتردد "beating" تعتمد على الحمل على المحرك (لأن ذلك يؤثر على التردد المنزلق).

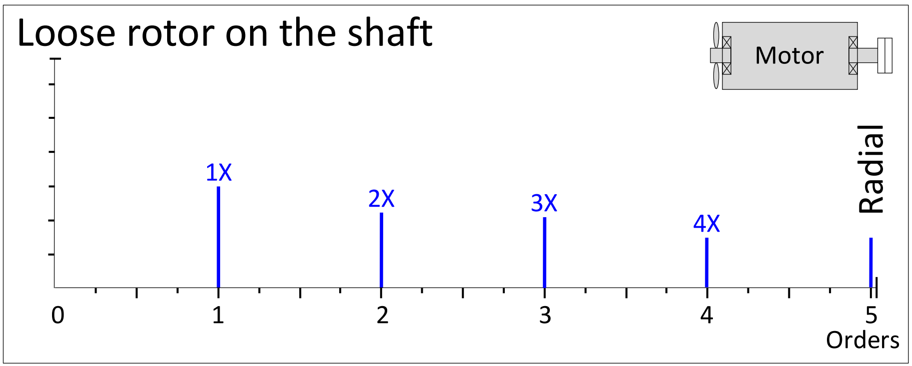
٨– تفكك بارات الروتور "Loose rotor bars"

إذا كان هناك تفكك فى بارات الروتور "loose rotor bars" سيكون فى بصمة الإهتزازات قمة عند تردد بار الروتور "rotor bar pass frequency" (عدد بارات الروتور "RBF" مضروبة فى سرعة الدوران "RPM")، مع ترددات جانبية "sidebands" من ضعف تردد التيار الكهربى (2 LF) (١٠٠ أو ١٢٠ هرتز). حتى لو كنا لا نعرف عدد بارات الروتور "rotor bars"، فإذا كنت ترى فى بصمة الإهتزازات تردد عالى "high frequency" مع ترددات جانبية من ضعف تردد التيار الكهربى، يمكنك أن تثق وتتأكد من وجود مشكلة تفكك بارات الروتور.



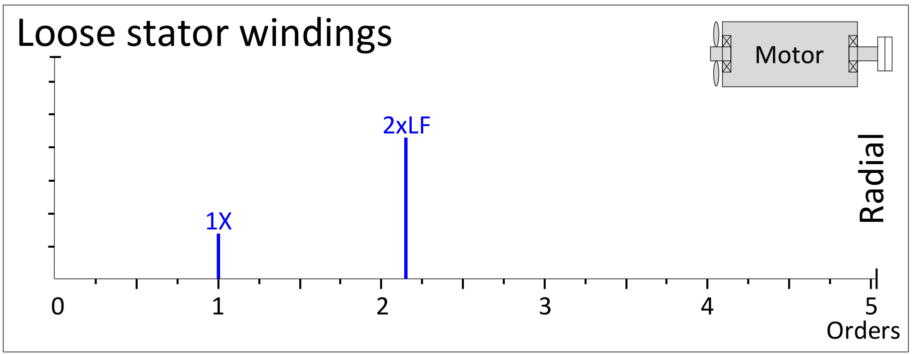
٩- تفكك الروتور على العمود "Loose rotor on the shaft"

فى بعض الأحيان يمكن للروتور أن ينزلق من على العمود "rotor can slip on the shaft" وعادةً يحدث ذلك بشكل متقطع تبعاً لدرجة الحرارة "depending on temperature" ، ويتسبب عن ذلك إهتزازات شديدة "severe vibration" عند سرعة الدوران (X١) وتوافقاتها "harmonics". والتغيرات المفاجئة فى الحمل "load" أو خط الجهد "line voltage" يمكن أن تزيد أو تظهر المشكلة.



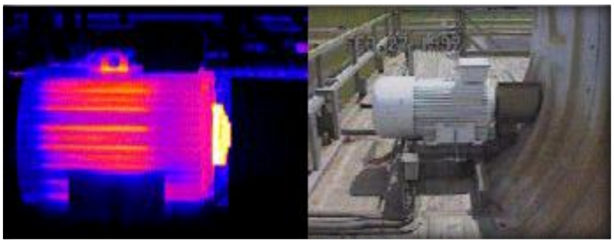
١٠- تفكك الملفات الكهربائية للإستاتور "Loose stator windings"

إذا كانت الملفات الكهربائية "electrical windings" للعضو الثابت للموتور (الإستاتور) مفككة بعض الشئ "little loose"، زاد مستوى الإهتزازات "vibration level" عند ضعف تردد التيار الكهربى (2 LF). هذه الحالة شديدة التدمير "very destructive" لأنها تكشط "abrades" المادة العازلة "insulation" على السلك الكهربائي، مما يؤدى إلى قطع الملفات وفى نهاية المطاف يحدث قصر بالدائرة "short circuits" إلى الأرض "ground" وينهار الإستاتور "stator failure".

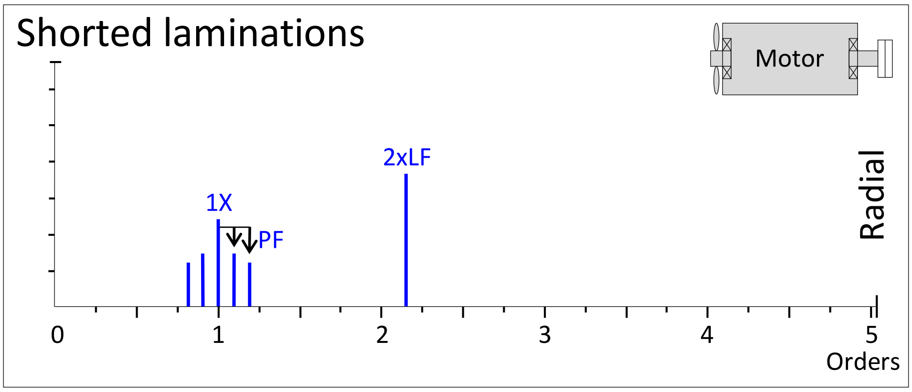


١١- مشاكل الرقائق الحديدية "Lamination problems"

الروتور "rotor" والإستاتور "stator" لمواتير التيار المتغير "AC motors" مصنوعة من شرائح رقيقة معزولة عن بعضها البعض. وإذا تلامست الرقائق الحديدية مع بعضها " Shorted laminations"، يحدث تسخين موضعي "local heating" وينتج عنه تشويه حراري " thermal warping".

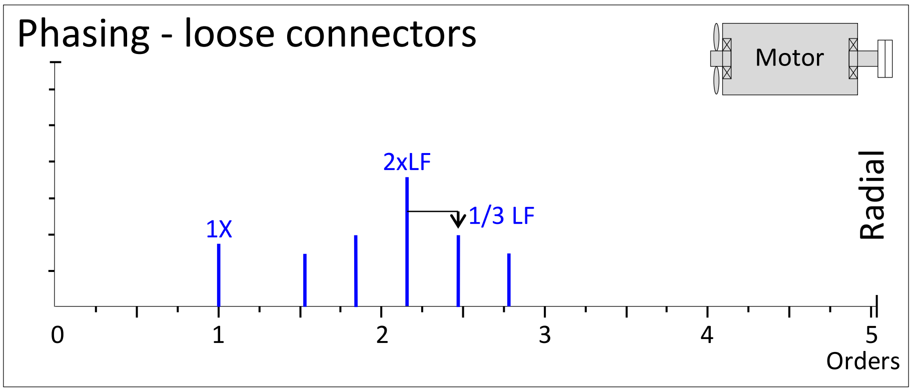


تلامس الرقائق الحديدية ينتج عنه إرتفاع مستوى الإهتزازات عند ضعف تردد التيار الكهربى (2LF). والتشويه "warping" يمكن أن يسبب إرتفاع مستوى الإهتزازات عند سرعة الدوران (X١)، ونلاحظ ترددات جانبية "sidebands" لتردد تجاوز القطب (PPF) " pole pass frequency" حول تردد سرعة الدوران X١ .



١٢- تفكك مسامير التربيط للطور "Phasing Loose connections"

تفكك أطراف توصيل الكهرباء للطور "Phase" من الممكن أن تسبب إهتزازات زائدة " excessive vibration" عند ضعف تردد التيار الكهربى (2 LF) (١٠٠ أو ١٢٠ هرتز)، مع وجود ترددات جانبية "sidebands" ١/٣ (one-third) التردد الكهربى (٣٣ أو ٤٠ هرتز).



١٣- المشاكل الأخرى للمحركات الكهربائية

١٣-١- أسباب حرق المواتير

هناك أسباب عديدة تم حصرها ولو تلافينا بعض هذه الأسباب كان من السهل جداً تقليل تلك المعدلات. وهناك أسباب ميكانيكية وأخرى كهربية كالآتى:-

أولاً:- الأسباب الميكانيكية

١- عدم الضبط الدقيق لمحاور الموتور مع المعدة.

٢- عدم إتزان العضو الدوار.

٣- تآكل بيت كراسى التحميل (على الأغطية الجانبية) مما يتسبب ذلك فى إختلال توازن العضو الدوار(الروتور) مما يسبب احتكاكه بالعضو الثابت (الإستاتور) ويحدث خلل فى أبعاد الثغرة الهوائية مما يؤدى إلى سخونه المحرك وإحتراقه.

٤- تلف في كراسي التحميل مما يؤدى إلي زيادة عالية نسبياً في الحمل الميكانيكي ينتج عنه زيادة أمبير التيار الكهربى أعلى من المقرر و حرق المحرك بعد فترة زمنية من التشغيل

ثانياً:- الأسباب الكهربائية

١- التحميل الزائد على المحرك، زيادة الحمل ولفترة طويلة يؤدي إلى إرتفاع حرارة أسلاك المحرك وذوبان مادة الورنيش العازلة ويرتفع التيار أكثر فأكثر حتى يحترق المحرك الكهربائي وهذا من أحد أهم الأسباب لإحتراق المحركات.

٢- فقدان أحد الأطوار من الأطوار الثلاثة (3-phases)، نقص في احد الفيوزات و استمرار المحرك بالعمل على فيوزين فقط.

٣- إرتفاع أو إنخفاض حاد في الجهد وكلاهما يؤديان الى ارتفاع التيار.

٤- وجود تماس كهربائي بين أحد الملفات و جسم المحرك

٥- تحميص المواد العازلة على الملفات مما يؤدى إلى كسر العزل.

٦- تعرض المحرك لرطوبة عالية بسبب المكان الذي فيه وبالتالي يزيد من تيارات التسريب مما يسبب إرتفاع حرارة الأسلاك وحرق المحرك.

ملحوظة:-

في حال وجود حمايات فعالة وسليمة بدائرة التحكم فمن المفروض أن تقوم بفصل المحرك أتوماتيكياً قبل الوصول لهذه الحالة.

١٣-٢- أهم الأعطال في محركات التيار المستمر

ظهور شرارة أثناء التشغيل نتيجة الأسباب التالية:-

١- عند تغيير الفرش الكربونية بأخري جديدة فإنها تأخذ وقت حتي تتطبع علي الكوميتوتر.

٢- تآكل الفرش الكربونية ووجود المادة الكربونية على الكوميتوتر وفي هذه الحالة يجب تنظيف الكوميتوتر.

٣- نقص في طول الفرش الكربونية.

١٣-٣- أسباب زيادة الأمبير في حالة عدم الحمل "no load"

١- زيادة طول الثغرة الهوائية بين العضو الدوار والجزء الثابت.

٢- نقص في عدد اللفات عن العدد الصحيح.

٣- التجميع الغير صحيح الذى أدى الى ازاحة العضو الدوار عن الجزء الثابت.

٤- تلف رولمان البلى المستخدم في تثبيت العضو الدوار.

٥- سوء الخواص المغناطيسية لرقائق العضو الثابت والمتحرك.

١٣-٤- أسباب إرتفاع صوت المحرك الكهربى

١- تلف رولمان البلي مع البيت الخاص به (الشمايز).

٢- الكوميتوتر غير منتظم ويحتاج الي مسه على المخرطة.

٣- احتكاك المروحة مع الغطاء الخارجى.

٤- عدم اتزان المحرك مع الحمل.

٥- يوجد تحميل زائد علي المحرك.

- النهاية -

الباب السابع

تشغيل برنامج ناجح لمراقبة حالة الماكينات الدوارة

Running a successful condition monitoring program



مقدمه:-

حان الوقت الآن للنظر في كيفية وضع كل هذه المعرفة الجديدة موضع التنفيذ أو إلى واقع عملي. ولقد فهمنا الاهتزازات، وتعلمنا كيفية قياس الاهتزاز، وتعلمنا كيفية حل المشاكل. ولكن ماذا تفعل الآن؟

لديك جهاز جامع البيانات وبرامج الكمبيوتر ماذا أنت فاعل؟ لكن أى من الماكينات تحتاج إلى إختبار؟ وعدد مرات الإختبار؟ ماذا تفعل مع النتائج؟ وماذا يمكنك القيام به لضمان النجاح على المدى الطويل؟ حسناً سنحاول الإجابة عن تلك الأسئلة الآن.

وهناك قواعد وشروط يجب أن تتوفر كى يتم تطبيق نظام مراقبة حالة الماكينات الدوارة على المعدات والغرض من هذه القواعد هو نجاح تطبيق هذا البرنامج وبالتالى ضمان إستمرار تلك المعدات فى العمل لآلاف الساعات طالما أنها تعمل بنعومه وداخل الحدود المسموحه للإهتزاز إلى أن يتحدد وبدقة متى تحتاج تلك المعدات إلى إصلاح وصيانة.

١- إجراء دراسة شاملة للمصنع "plant survey"

يجب أن نرجع خطوة الى الوراء وإجراء إستعراض لمعدات المصنع (حصر جميع الماكينات). يجب عليك أن تنظر للمسائل المالية وكذلك القضايا المادية (سهولة الوصول إلى الماكينات والموقع "location"، الخ...).

١-١- المسائل المالية "Financial issues"

لا تنسى أبداً أن ما تقومون به يجب أن يكون مبرراً من الناحية المالية "financially justifiable". إذا كان الوقت والجهد اللازمين لمراقبة الماكينة لا يمكن تبريرها ، فلا يمكن مراقبة الماكينة.

عليك أن تضع فى الإعتبار تاريخ الماكينة (أهمية الماكينة – زمن التوقف والإصلاح – تكلفة الإصلاح – قطع الغيار – تأثير الماكينة على العملية الإنتاجية).

أنت أيضاً بحاجة لإجراء تحليل المخاطر "risk analysis". وهذا التحليل يساعدك على أن تقرر ما إذا كان سيتم رصدها أو مراقبتها وعدد المرات القياس ونوع التكنولوجيا التى ستستخدم.

قد تتغير المخاطر خلال العام نتيجة الظروف الجوية السيئة (الصيف لمحطة تبريد، في فصل الشتاء لتوليد الطاقة، على سبيل المثال)، فمن الممكن أن تحتاج إلى تغيير خطة القياس وعددها وكذلك خطة الإصلاح.

يجب عليك بعد ذلك النظر في التقنيات اللازمة للكشف عن المشاكل. يمكنك أن تكون ناجحاً مع الاهتزازات ومن الممكن أن تحتاج إلى تقنيات أخرى تشمل (الأشعة تحت الحمراء، وتحليل الزيوت أو تحليل الإجزاء المتآكلة "wear particle"، الخ..).

١-٢- المسائل المادية "Physical issues"

مع أي تكنولوجيا للمراقبة، يجب عليك أن تنظر إلى السلامة والأمان "safety" والمسائل العملية. إذا كان لديك محطة نائية "remote plant"، أوالمعدات الموجودة في بيئة خطرة " hazardous environment" أو رولمان البللى يقع في أماكن يصعب الوصول إليها"inaccessible locations" وبالتالى قد نحتاج إلى أجهزة استشعار دائمة "permanent sensors" أو مراقبة دائمة " on-line monitoring". ويمكن تركيب أجهزة استشعار دائمة داخل الماكينة وربطها بنقط إتصال تقع في مكان مناسب.

٢- إختيار الماكينات المراد إختبارها

بعد إجراء تحليل المخاطر "risk analysis" ودراسة الجدوى"feasibility study" تحتاج بجانب ذلك النظر في بعض المسائل العملية. عند بداية العمل بنظام مراقبة الماكينات فمن السهل أن تصبح أكثر حماساً وتحاول مراقبة كل الماكينات دفعةً واحدة. وهذه خطوة محفوفة بالمخاطر للغاية.

يجب عليك أن تبدأ مع مجموعة من الماكينات يمكنك التحكم بها والسيطرة عليها. يجب عليك عدم التحميل على نفسك. يجب عليك التأكد من أنك ناجح مع تلك المجموعة من الآلات قبل أن تضيف ماكينات أخرى إلى البرنامج.

٣- تقسيم الماكينات من حيث الأهمية

والبرنامج الناجح يأخذ فى إعتباره أهمية المعدات بالنسبة للإنتاج وتاريخ الأعطال بها ووضع خطة القياس الشهرية بحيث تتلائم وتتوافق مع تلك الأهمية ويتم تقسيم الماكينات إلى:-

١- ماكينات حرجة وهامة "Critical"

وهذه المعدات تقاس أسبوعياً وهى المعدات التى تؤثر بشكل مباشر فى العملية الإنتاجية وإذا حدث لها كسر مفاجىء سوف يحدث الآتى:-

- إيقاف المصنع عن العمل.
- إصلاحها يكون مكلف.
- أخذ وقت طويل فى تجهيز قطع الغيار.
- إصابة أو قتل أحد العاملين.
- التسبب فى إيقاف العاملين عن أداء عملهم.

٢- ماكينات متوسطة الأهمية "Sub-critical"

وتقاس تلك المعدات كل أسبوعين وهى المعدات التى إذا حدث بها عطل يكون له صدى ولكن ليس له مردود على عملية الإنتاج أو على الأفراد.

٣- ماكينات أقل أهمية "Non critical"

وتقاس تلك المعدات شهرياً وهى المعدات التى لها إحتياطى ولا تمثل خطورة عند توقفها.

٤- تجميع البيانات الفنية للمعدات (تعرف على ماكينتك)

بعد حصر المعدات المطلوبة للمراقبة تحتاج بعد ذلك إلى عمل قاعدة للبيانات لكل الماكينات تشمل قائمة من التفاصيل الرئيسية لكل ماكينة. ويتم تجميع تلك البيانات الفنية بواسطة مهندسى الصيانة لتوفر تلك المعلومات لديهم والمعرفة التامه بمواصفات تلك المعدات حيث أنهم قائمين بصيانتها وبالتعاون مع مهندسى مراقبة حالة المعدات.

وهذه البيانات الفنية مطلوبة لبناء قواعد البيانات للمعدات بغرض قياس وتحليل وتشخيص إهتزازاتها. وفى حالة عدم توفر بعض البيانات الفنية فإنها تستكمل تدريجياً إما بمخاطبة جهة التصنيع (التوريد) إذا لزم الأمر أو بالفحص الظاهرى أو عند فك تلك المعدات لصيانتها .

وتشتمل البيانات الفنية على الآتى:-

- إسم المعدة وموقعها ونوعها.
- رسم كروكى للمعدة موضح بها تسلسل أجزائها وبيانات كل جزء.
- سرعة دوران الأعمدة "shaft speeds".
- بيانات تفصيلية عن كراسى التحميل (النوع – الطراز – الرقم – الشركة المصنعة).
- بيانات تفصيلية عن وصلات فصل ووصل الحركة (النوع – عدد المسامير – عدد الأسنان).
- بيانات تفصيلية على المحركات (النوع – القدرة – أرقام كراسى التحميل – مروحة التبريد عدد بارات الروتور"rotor bars").
- بيانات تفصيلية عن المراوح (النوع – عدد الريش "blades" – السرعة – عدد المراحل – كراسى التحميل).
- بيانات تفصيلية عن الطلمبات (النوع – عدد الريش "vanes" – السرعة – عدد المراحل – كراسى التحميل).
- بيانات تفصيلية عن صناديق التروس (رسم كروكى يوضح تسلسل تركيب التروس – عدد الأسنان "teeth" – السرعة).
- بيانات السيور (عددها – أقطار الطنابير "sheave" – طول السير – البعد بين مركز الطنبورتين – السرعة).
- بيانات تفصيلية عن التوربينات أو ريش الضواغط (عدد المراحل – ضغط كل مرحله – السرعة الحرجة – عدد الريش – كراسى التحميل).
- فى حالة المدرفلات (بيانات المحرك – نوع القارنة – كراسى التحميل – السرعات – الحمل – نوع المادة المدرفلة ... إلخ).

من المفيد جداً معرفة تفاصيل رولمان البللى – التفاصيل المادية (نوعة – الشركة المصنعة – عدد الكرات ...إلخ) أو الترددات القسرية "forcing frequencies". ومن الممكن معرفة بعض المعلومات من بصمة الإهتزازات فمثلاً إذا راقبت طلمبة ووجدت قمة عالية عند X٦ أمكنك معرفة عدد الريش.

٥- إختيار مواضع نقط القياس على المعدات وطريقة التثبيت

الخطوة القادمة هى عمل خطة لمراقبة الماكينات "monitoring plan" – وتحديد أماكن وضع جهاز الإستشعار على الماكينات فى المحاور الثلاث للمراقبة (المحورى "axial" والأفقى "horizontal" والرأسى "vertical").

ولسوء الحظ أنه لا يمكن تثبيت مجسات الإهتزازات "Vibration transducers" على الروتر نفسه ولهذا يجب أن نتتبع سريان القوة من الروتر خلال كراسى التحميل إلى الأرضية "Foundation" ونقوم بتثبيت المجسات "Transducers" فى إتجاهات القوى بحيث تكون ملامسة للأجزاء الميكانيكية المثبت عليها العضو الدوار.

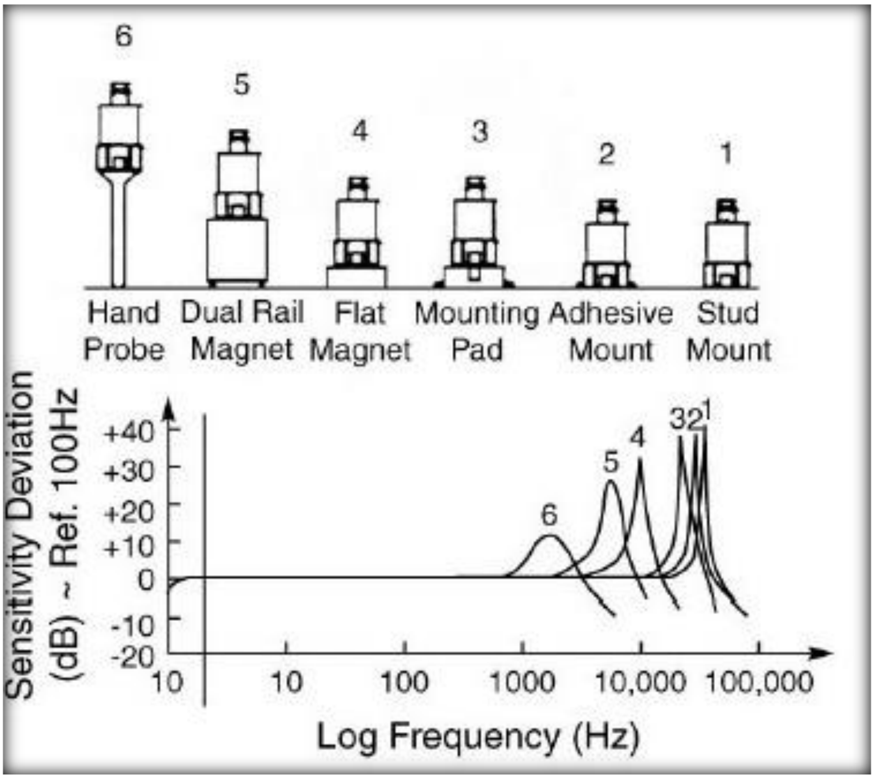
السبب في ازدياد الاهتزاز للماكينات هو التآكل الحادث في أجزائها المتحركة وعلى ذلك فان أنسب الأماكن لقياس الاهتزاز هو قربها للأجزاء المتحركة.

ولذلك توضع أجهزة الإستشعار (اللواقط) على أو بالقرب من الأجزاء المتحركة بقدر الإمكان. وتعتبر أغطية كراسى المحور وأجسامها أنسب الأماكن لالتقاط هذه الإشارات وتؤخذ القراءات في ثلاث اتجاهات المحورى (فى اتجاه محورى الدوران) والآخر مركزي (مار بمحور الدوران) والمقصود بالمحور المركزى (الإتجاه الأفقى والرأسى).

من الناحية المثالية، بيانات الإهتزاز

"Triaxial sensor" وإذا كان جهاز جامع البيانات به قناه واحدة يمكنك قياس محور فقط فى كل مره. يجب عليك أن تقرر أى إتجاه للقياس يكون بياناته أكثر فائدة.

طريقة تثبيت اللاقط "mounting method" وسطح التثبيت "mounting surface" يمكن أن يؤثر سلباً فى قياس كل من الإهتزازات و"PeakVue" (السطح المدهون مقارنة بالسطح غير المدهون والسطح المستوى مقارنة بالسطح المنحني .. الخ) وكل ذلك يمكن أن يحد من مدى إستجابة اللاقط للترددات العالية (FMAX) كما هو مبين بالشكل.

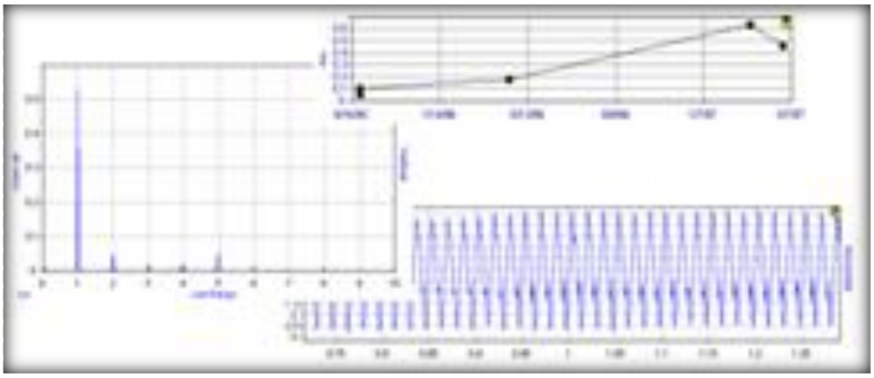


٦- أنواع وخصائص القياسات على المعدات

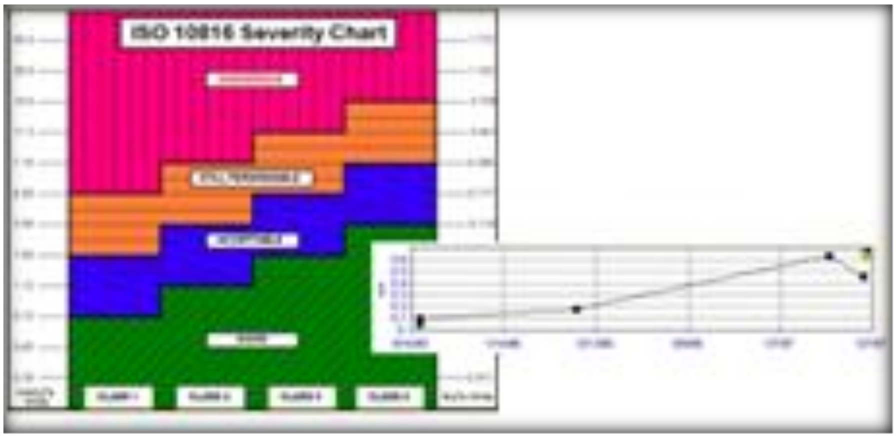
هناك أنواع "types" من القياسات مثل (المستوى العام للإهتزازات "overall level" والبصمة "spectrum"، .... إلخ) أما خصائص "specifications" الإهتزازات فهى تشمل (مدى التردد "frequency range" وعدد المتوسطات "number of averages"..إلخ).

كل جزء من البيانات التى تجمع تستغرق وقتاً للقياس والتخزين والتحليل وعمل التقارير. ولكن فى الأيام الأولى من البرنامج قد يكون من الحكمة التوقف عن جمع بعض البيانات التى من الممكن أن تكون جمعت عن طريق الخطأ أو الغير مفيدة وحذفها.

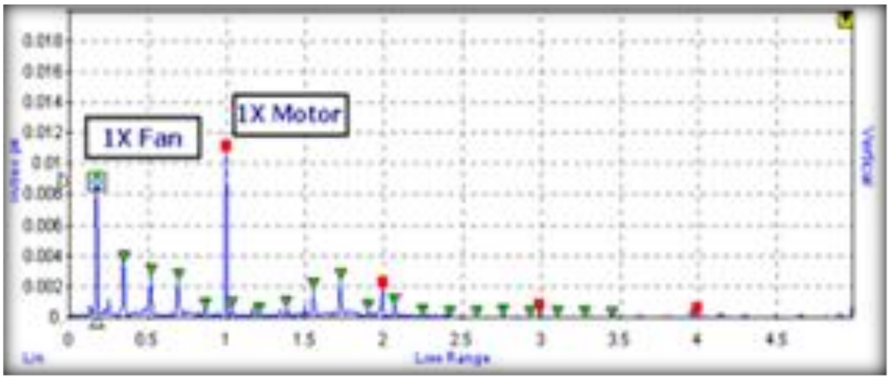
هناك خيارات عديدة لأنواع القياسات وهى قياس المستوى العام للإهتزازات (عادة من ١٠-١٠٠٠ هرتز) والشكل الموجى "Time waveforms"، بصمة الإهتزازات "spectra"، قياسات خاصة برولمان البللى (spike energy،shock pulse، HFD ، إلخ) وغيرها.



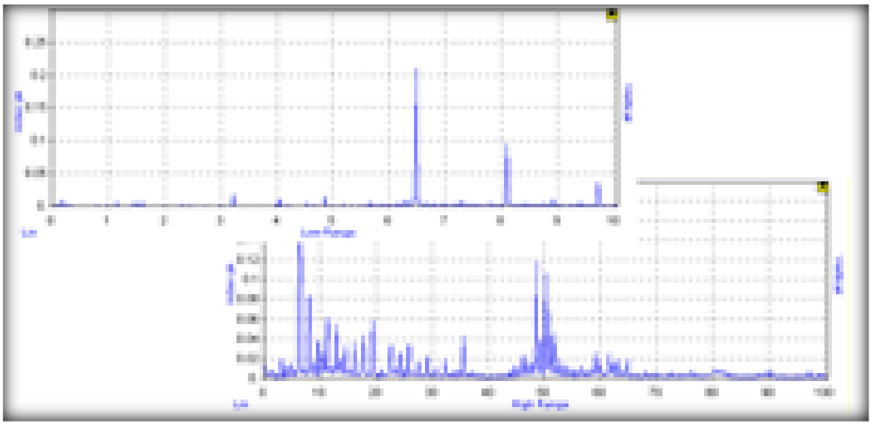
المستوى العام للإهتزازات من الممكن أن يكون مفيداً لعمل منحنى الإطراد "trend"، والمقارنة بالمعايير القياسة "standards charts" ويمكن إستخدامه فى بداية العمل كنظام إنذار أساسى.



عند جمع بصمة الإهتزازات "Vibration spectra" يجب إختيار كل من مدى التردد بعناية "frequency range" ودرجة الوضوح "resolution". ومن الأفضل تقوم بحساب الترددات القسرية "forcing frequencies"، وأخذ القياسات بمدى تردد أعلى من الترددات القسرية لا يقل عن ٣٠%. ودراسة أو فحص هذه القياسات قد تكشف عن الترددات الهامة التى ينبغى رصدها بشكل روتينى.



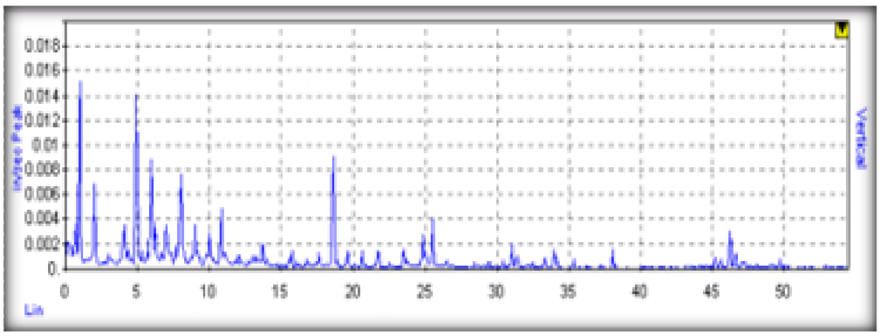
بعض أجهزه جمع البيانات قادره على جمع إثنين من القياسات بنطاقات تردد مختلفة أتوماتيكياً واحدةً بعد الأخرى. وأغلب الأجهزة الأخرى تدعم فقط مدى تردد واحد (Fmax) لكل "نقطة" فى قاعدة البيانات.



إذا رغبت فى عمل نطاقين للتردد أحدها بنطاق تردد منخفض "low range" ويقدر بعشرة أضعاف سرعة التشغيل (١٠ مرات سرعة التشغيل) والآخر بنطاق تردد عالى "high range" ويقدر مائه ضعف سرعة الدوران (١٠٠ مره سرعة التشغيل).

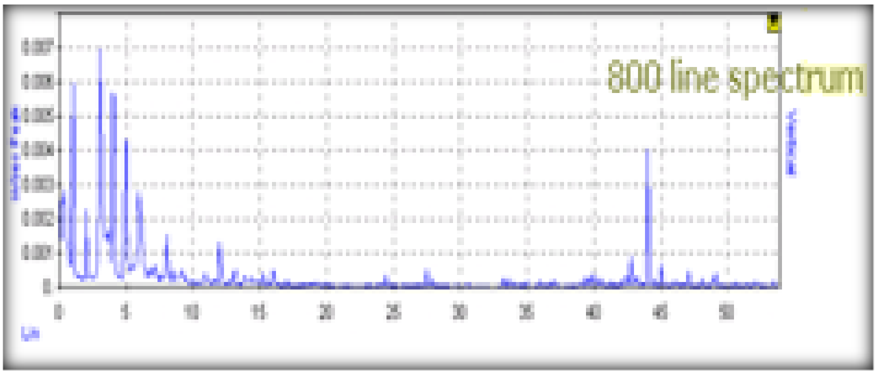
النطاق المنخفض "low range" سيكون بدرجة وضوح ممتازه لكل من X١ وX٢ وتردد الريش والترددات الأولية لرولمان البللى (first order). أما نطاق التردد العالى "high range" فيستخدم لترددات رولمان البللى وتوافقاتها وتوافقات ترددات الريش "vane pass/blade pass" وتعشيق التروس وغيرها من الترددات العالية.

وإذا رغبت فى جمع بيانات الإهتزازات بقياس واحد فإننا نوصى بأن يكون نطاق التردد ٦٠ مرة لسرعة الدوران. حيث يعطى درجة وضوح كافية للترددات المنخفضة وما يزال يغطى توافقات ترددات رولمان البللى وغيرها من الترددات العالية.



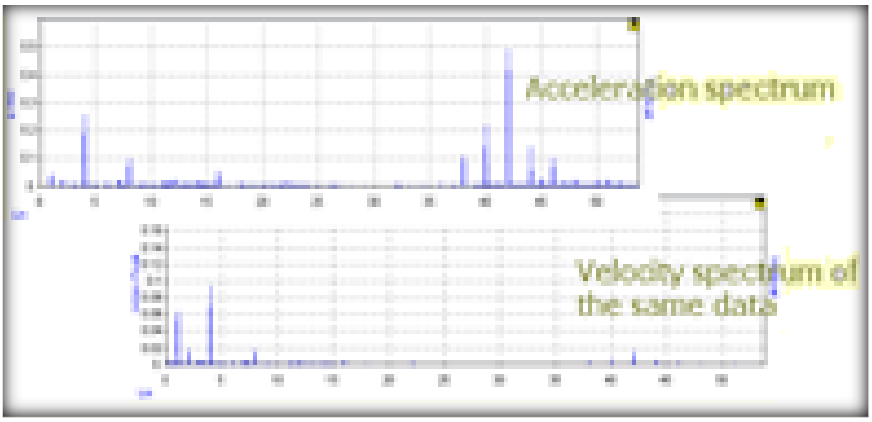
على الرغم من أن القياسات ٤٠٠ خط كانت القاعدة الأساسية لسنوات عديدة، فإننا نوصى بقياسات ٨٠٠ خط. الماكينات عالية السرعة، هناك حاجة إلى قياسات ١٦٠٠ خط (أو ٣٢٠٠ خط) ويجب التفكير فى وضع هذه الأرقام بعناية.

ولكن للتبسيط يجب أن تكون درجة الوضوح "resolution" حوالى ١ هرتز لكل خط فى بصمة الإهتزازات (Line / one Hz).

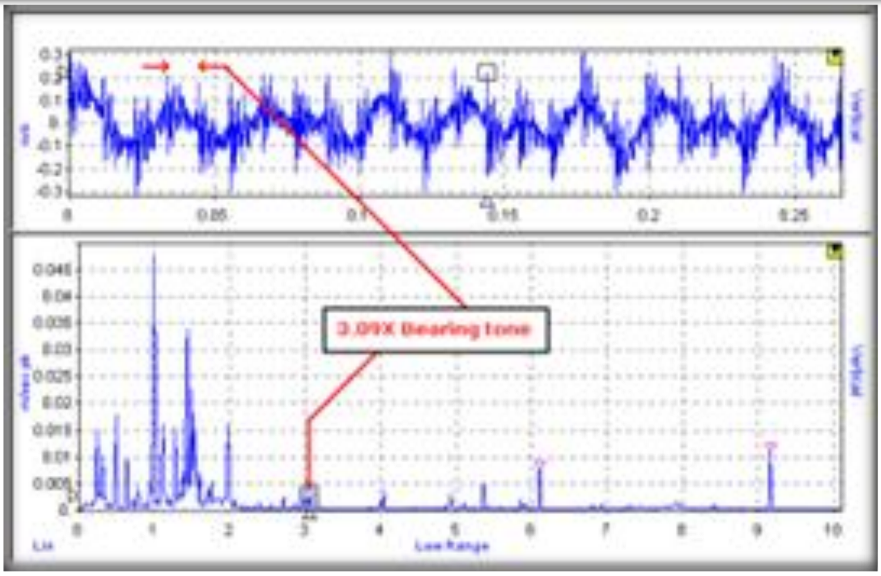


الماكينات المنخفضة والعالية السرعة يجب التأكد من وجود قدر كاف من درجة الوضوح "resolution" وكذلك مدى أو نطاق التردد لكل الترددات الموجودة. فى مثل هذه الحالة يمكنك إختيار قياسات ١٦٠٠ خط (أو ٣٢٠٠ خط) بدلا من ٨٠٠ خط.

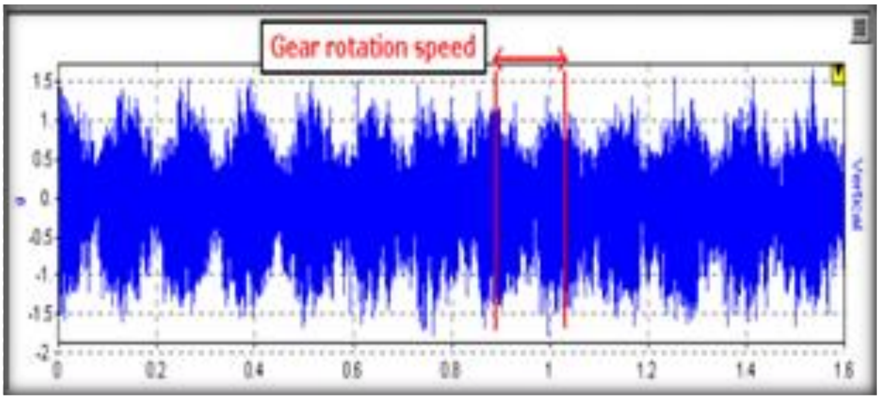
على الرغم من أنه من الشائع قياس الإهتزازات ببصمة السرعة (mm/sec)، فإننا نصح بقياس الإهتزازات ببصمة العجلة "acceleration" فى الماكينات عالية السرعة مثل ضواغط الهواء "compressors" وصناديق التروس "gearboxes" والتربينات "turbines".



يجب عليك أيضاً جمع الشكل الموجي. فمن المستحسن أن تقوم بجمع الشكل الموجي مع كل بصمة قمت بجمعها. فهى تساعدك على اكتشاف وتشخيص مجموعة من الأعطال.



إذا كنت تقوم بجمع الإهتزازات فى محاور متعددة عند نقطة أو تستخدم جهاز إستشعار ثلاثى المحاور "triaxial sensor" (لقياس الثلاث محاور مرةً واحده) يمكنك أن تختار تخزين شكل موجى "waveform" واحد على أحد المحاور فقط لتلك النقطة.



إذا كان جهاز جامع البيانات يدعم نطاقان للتردد "two frequency ranges" كما وضحنا من قبل فيجب قياس الشكل الموجى "time waveform" فى نطاق التردد العالى "high range". بعض أجهزه جامع الإهتزازات تدعم جمع عينات الشكل الموجى مستقلة. ومهما كانت الحالة، يجب إستخدام معدل سريع لأخذ العينات "fast sampling rate" حتى يمكننا إكتشاف الصدمات "impacts" فى الشكل الموجى. واذا كان جهاز جامع الإهتزازات به إمكانية قياس إهتزازات رولمان البللى بطرق مختلفة أو بقياسات خاصة يجب الإستفادة من هذه الخصائص والحصول عليها بشكل روتينى. مع العلم بأن قياس بصمة الإهتزازات "Demodulated spectrum" تؤخذ عادةً فى نطاق التردد العالى "high range" بتردد يقدر ٢٠ ضعف سرعة الدوران.

٧- إعداد قاعدة البيانات "Setting up the database"

ونتيجةً لإختلاف أنظمة مراقبة حالة المعدات فإنه من الأفضل إستخدام النظام لتوظيف قاعدة البيانات لتحديد الترددات القسرية "forcing frequencies" ونطاقات التردد والتقارير الإستثنائية "exception reports" والنظم الخبيرة "expert systems" وجعلها تعمل بالشكل الصحيح.

والمهمة هى حصر الماكينات وتحديد كل ماكينة (الإسم المتعارف عليه من الجميع) وموضع نقط القياس. ومواضع نقط القياس غالباً ما ترقم بدءًا من الجزء القائد مارًا بمجموعة نقل الحركة "power train" إلى الجزء المنقاد.

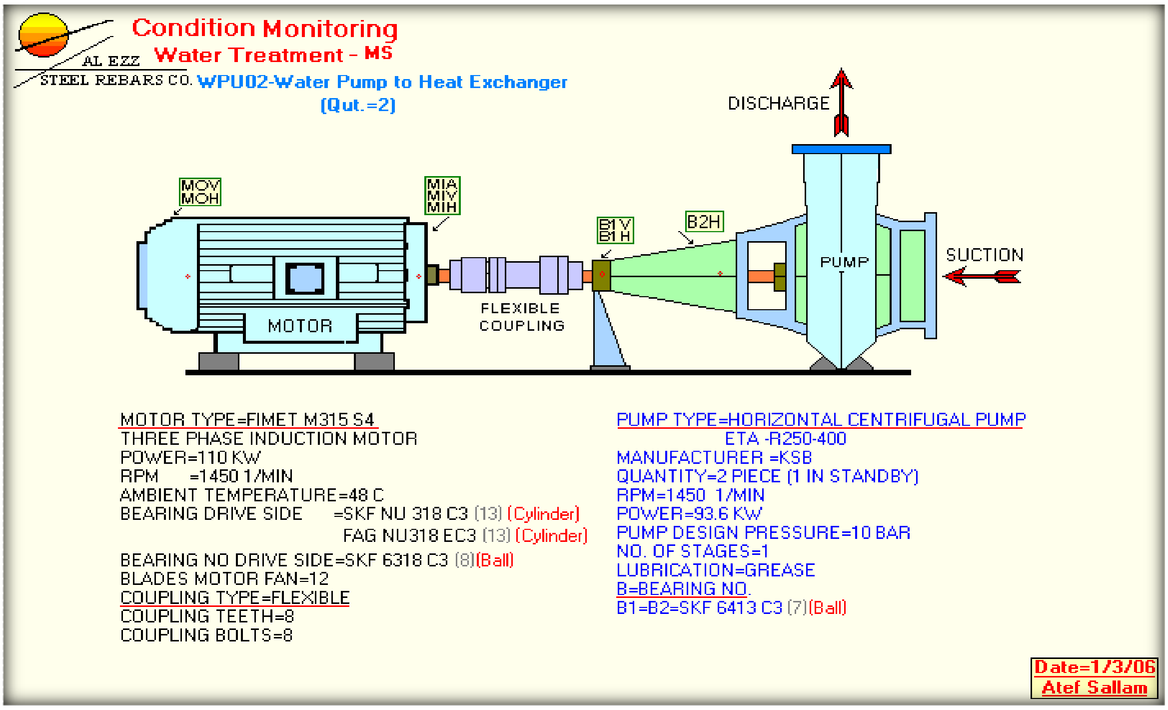
ويتم وضع مكعبات من الألومنيوم عند النقط المختارة وتصنع تلك المكعبات خصيصاً لهذا الغرض (طول ضلعها ٢٥ سم) وبها ثقوب مقلوظة فى ثلاث أضلاع متعامدة لسهولة تركيب لاقط القياس "Accelerometer" عند القياس وتلصق هذه المكعبات أو تلحم فى الأماكن المحدده ويمكن أيضاً وضع علامات على نقط القياس المختارة بواسطة أقلام غير قابلة للمسح أو الإزالة.

يجب إستخدام إصطلاحات لتسمية نقط القياس بحيث تكون مفهومه ويمكن التعرف عليها. حيث سوف تظهر أسماء نقط القياس وإسم الماكينة وموقع القياس على شاشة جهاز جامع الإهتزازات وفى التقارير ويجب أن يكون واضحاً.

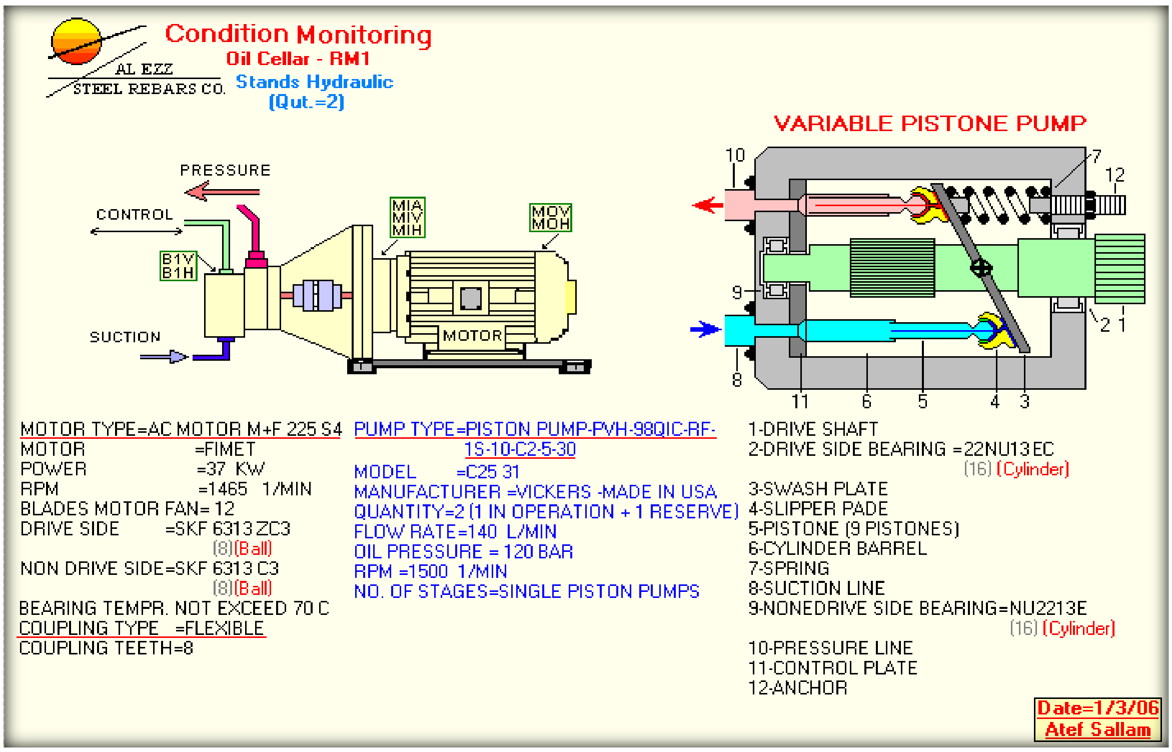
فمثلاً عند تسمية نقط القياس على الموتور من الجهة الخارجية Motor outboard (MO) وتكون نقط القياس فى الإتجاهات الثلاث هى (MOA , MOV , MOH) وعند الجهة الداخلية منه Motor inboard (MI) وتكون نقط القياس فى الإتجاهات الثلاث هى (MIA , MIV , MIH) وبالمثل يمكن تسمية باقى نقط المعده.

٧-١- أمثلة لرسومات الماكينات موضحاً بها تسلسل أجزائها ونقط القياس عليها

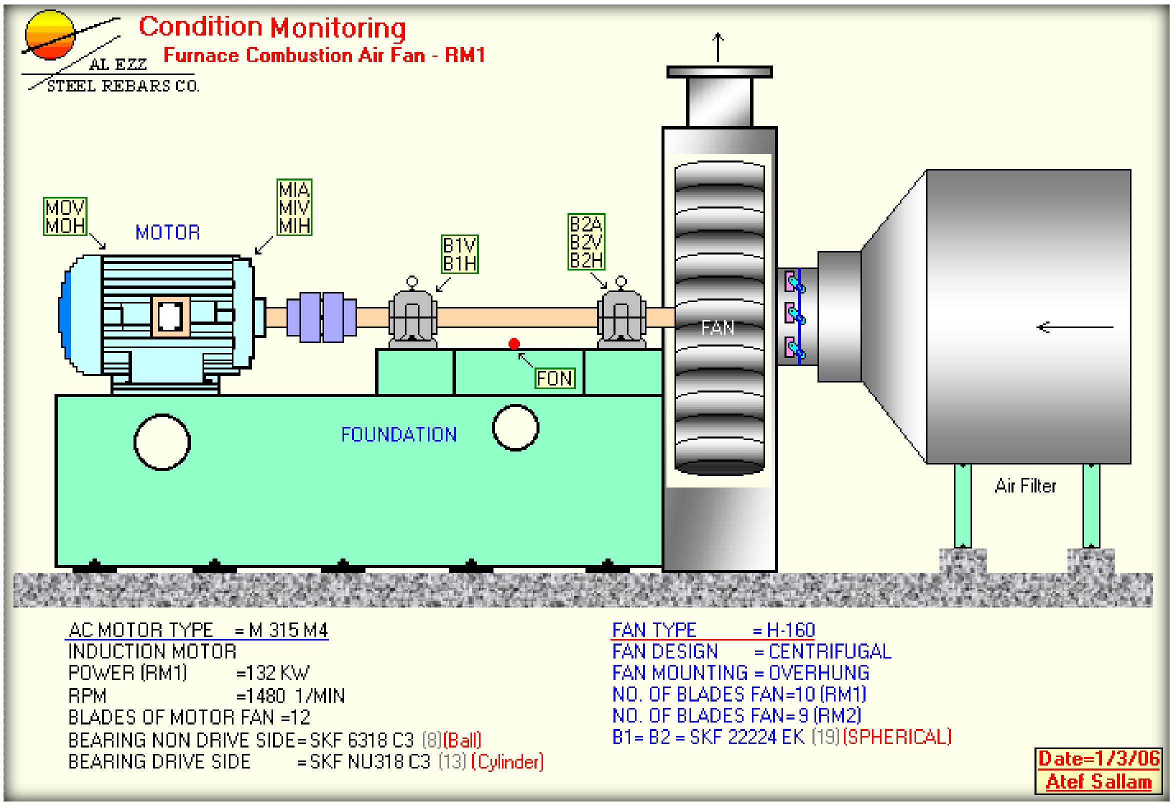
مثال ١:- طلمبة مياه:



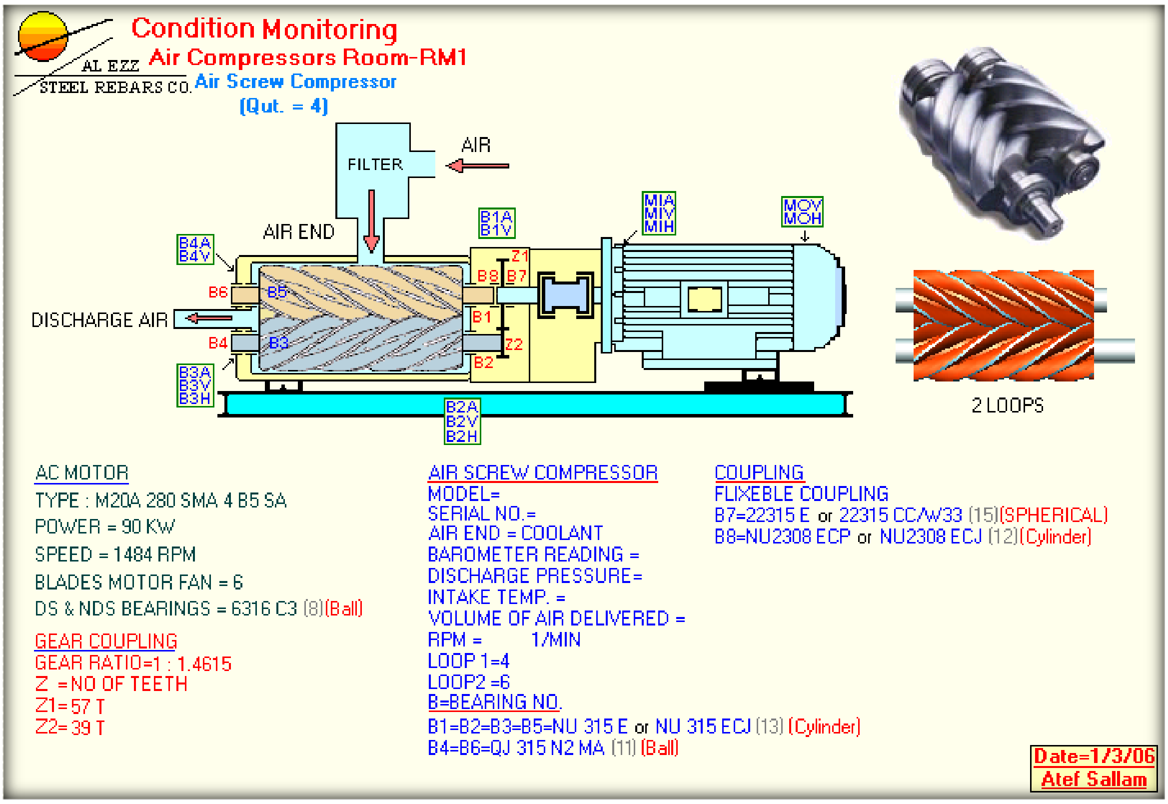
مثال ٢:- طلمبة هيدروليكية:



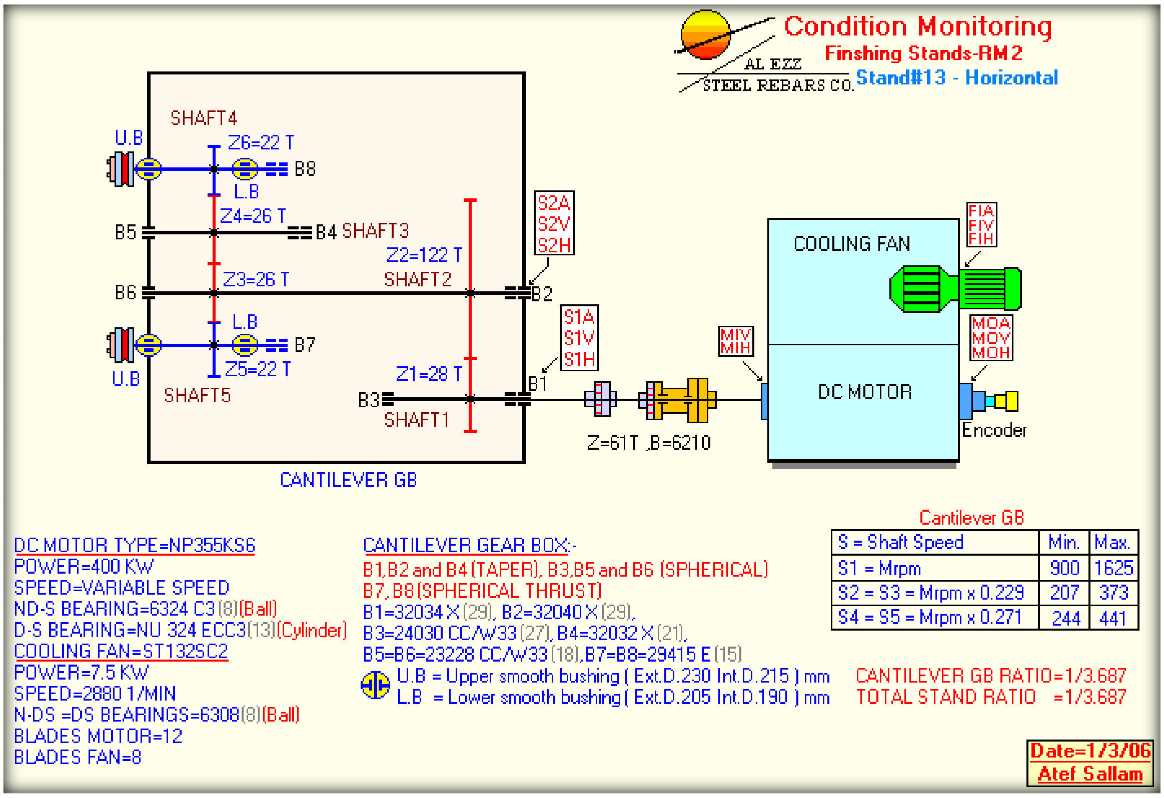
مثال٣:- مروحة:



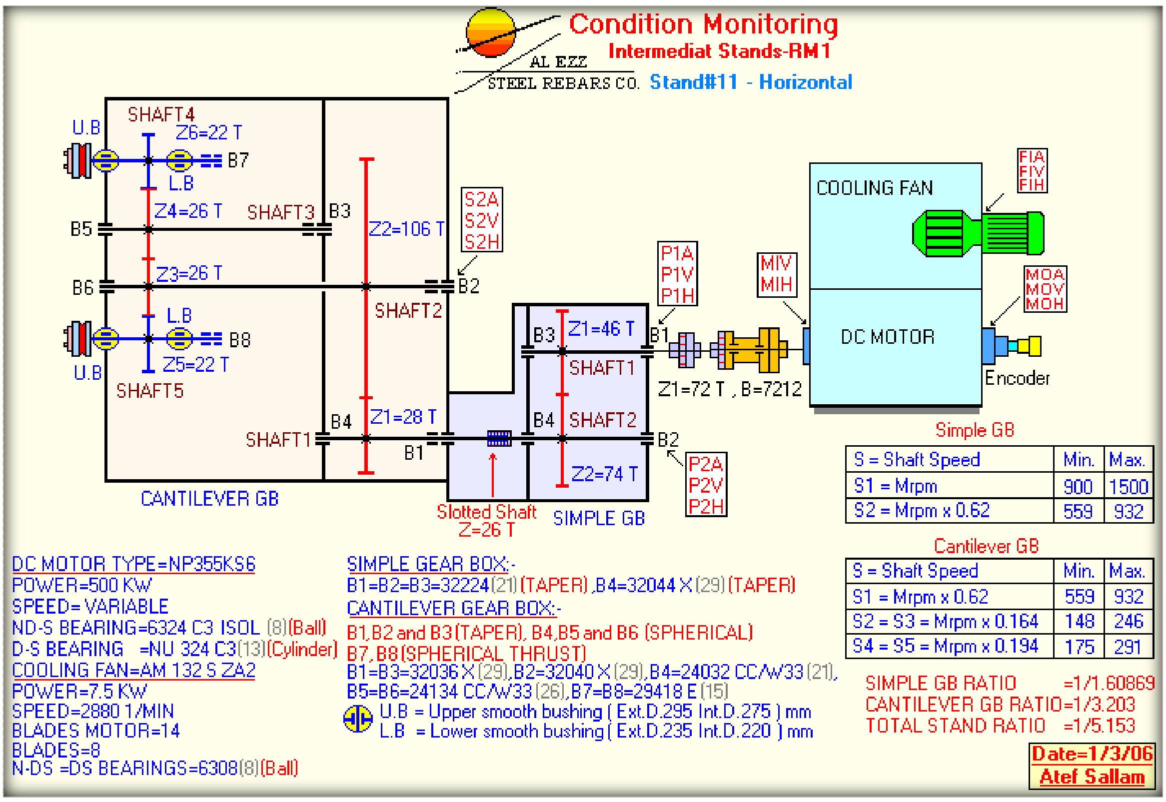
مثال٤:- ضاغط:



مثال٥:– إحدى إستندات خطوط الدرفلة:



مثال٦:– إحدى إستندات خطوط الدرفلة:



٧-٢- تحديد الحدود المسموحه لإهتزاز المعدات

وجد من الخبرة المكتسبة أن (القيمة الفعلية لسرعة الإهتزازات) والمحسوبة على أساس الجذر التربيعى لمتوسط مجموع المربعات (R.M.S) هى أفضل مؤشر لعنف الإهتزازات إذا ما قورنت بقيمة التسارع أو الإنتقال الناتج عن هذه الإهتزازت. وتستعمل القيمة الفعلية للسرعه كمعيار لتقدير حالة الماكينة وسلامة الأشخاص العاملين عليها فى بلاد العالم المختلفه. ولقد نظمت جداول عالمية لتحديد القيمة النمطية لهذه السرعات فى مختلف الظروف ومختلف أنواع الماكينات وتمثل هذه القيم عنف الإهتزاز المقبول.

والقيم القياسية العالمية (ISO standards) تكون جيدة فى بداية تطبيق برنامج الصيانة التنبؤية إلى أن يتم إنشاء تاريخ للماكينة.

ومع ذلك المقاييس العالمية تحدد حالة الماكينة ككل (جيدة) أو (غير جيدة) لمدى واسع من الماكينات المختلفة بالرغم من إختلاف ظروف كل ماكينة عن الأخرى فى النواحى الآتية:-

- إختلاف التصنيع .
- إختلاف القواعد الإنشائية (الأرضية).
- إختلاف ظروف التشغيل (الحمل - السرعة - البيئة - المنتج - .... إلخ).
- إختلاف أعمال الصيانة.

وليس واقعياً أن تحكم على حالة الماكينة بمقارنة قراءاتها الحالية مع مدى واسع من الماكينات تبعاً للأيزو أو تبعاً لأى قواعد ومستويات عامة بل يجب مقارنة القيمة الحالية مع القيمة السابقة "Historical values" وبالتالى نستطيع وبسهولة تحديد حالة الماكينة والتغير الحادث بها بمرور الوقت.

وهناك مقولة تقول "قارن التفاح بالتفاح" "You 're comparing apples to apples".

وأن أمثل الطرق لمعرفة حالة الماكينات هو أخذ قراءات الإهتزازات لكل ماكينة وهى جديدة وإستخدام هذه القراءات كمرجع للحكم على حالة الماكينة أثناء إستخدامها فيما بعد.

ولكن نادراً ما يحدث ذلك عند البدء فى برنامج الصيانة فإن الماكينات تكون موجودة فعلاً وقد إستخدمناها لفترات متفاوته وفى هذه الحالة ينصح بإستخدام القراءات المأخوذه على الماكينات التى أجريت لها عمليات صيانة وضبط كمرجع إبتدائى يمكن الرجوع إليه لمعرفة تدهور حالة الماكينة ويمكن تعديل هذا المرجع على ضوء الخبرة المكتسبة.

٨- قياس الإهتزازات على المعدات بالموقع تبعاً لخطة القياس

بعد إعداد قواعد البيانات للمعدات بكل دقة كما هو موضح سابقاً يتم البدء فى التطبيق الفعلى لبرنامج الصيانة الحديثة (التنبؤية) على المعدات وتقاس الماكينات فى مواقع عملها الفعلية وفى ظروف التشغيل الطبيعية وأن تعمل بسرعتها القصوى.

يجب عليك إنشاء معيار لتكرار ظروف الإختبار، فمن المهم جداً أن تعمل الماكينة فى نفس ظروف التشغيل عند كل إختبار (نفس السرعة بحيود قليل لايتعدى ٥% ونفس الحمل ويفضل القياس عند الحد الأقصى للأحمال) وبالتالى يكون الشئ الوحيد الذى من الممكن أن يتغير أثناء الإختبارات هو حالة الماكينة.

ويستخدم لهذا الغرض أجهزة محمولة وبرامج جاهزة للصيانة التنبؤية لجمع بيانات الإهتزازات على المعدات.

جمع بيانات الماكينات يوم بعد يوم

وبمجرد الانتهاء من إعداد النظام، سيكون العمل الأساسى هو جمع البيانات وفقاً للجدول الزمنى والذى كنا قد أنشأناه قبل ذلك. والجدول المثالى ينبغى أن يكون جدول زمنى مرن بحيث إذا كانت إحدى الماكينات بها مشكلة فيجب قياسها بشكل متكرر أكثر "more frequently". وإذا كانت بعض الماكينات موثوق بها للغاية "very reliable" على مدى فترة طويلة من الزمن يمكننا قياسها بشكل أقل قليلاً "less frequently".

٩- مرحلة إكتشاف المشكلة "detection phase" انظر إلي القسم الثالث من الباب الخامس

١٠- مرحلة تحليل المشكلة "analysis phase" انظر إلي القسم الرابع من الباب الخامس

١١- عمل التوصيات "recommendation"

بعد أخذ صورة شاملة وكاملة على كيفية مراقبة الماكينات يجب عليك تقديم توصية عن حالة الماكينة ووصف ما بها من مشاكل وتقديم خطوات محددة لأخذ الإجراءات الكفيلة بحل المشكلة ومنع تكرارها مرة أخرى.

وأخذ الإجراء الفعلى لحل المشكلة يعتمد على طبيعة وشدة العطل، ويعتمد أيضاً على متطلبات الماكينة من توافر قطع الغيار، وغير ذلك. وهو قرار إقتصادى بالدرجة الأولى ومن الممكن أن يكون محبطاً لك حيث أن كل المجهودات التى قمت بها لتحليل وتشخيص المشكلة من الممكن أن يتجاهلها الجميع.

ويجب أن تدرك دائماً أن هناك مسئولين من مهامهم الرئيسية هو إستمرار تشغيل المصنع وحساب ميزانية الصيانة. هناك عوامل كثيرة يجب النظر إليها قبل تنفيذ إصلاحات غير مجدولة.

من الناحية المثالية إنك سوف تعطى الكثير من التحذيرات حول المشكلة بحيث يمكن تنفيذ الإصلاح خلال وقت الصيانة المخططة القادمة. وهذا هو الهدف النهائى.

يجب أن نفهم أيضاً وخاصة فى الأيام الأولى من تطبيق النظام أن العاملين فى الصيانة والإنتاج والعاملين بالإدارة الهندسية يشككون فى تحليل وتشخيص المشكلة. يجب أن تتحلى دائماً بالصبر ويجب أن تكون دائماً إستباقى "proactive".

يجب أن تحاول أن تناقش هؤلاء العاملين ليفهموا كيف وصلت إلى هذا الإستنتاج وتحاول إشراكهم فى عملية التشخيص.

يمكنك التشاور معهم حول المشاكل السابقة، وتاريخ الإصلاح، وسجل الماكينات المتماثلة والأداء الحالى للماكينات، وسماع أصوات غريبة أو ضوضاء وغير ذلك وبالتالى سوف تشعرهم بأنهم جزء من العملية وبالتالى يمكنك جعلهم جزء من الفريق.

آخر شئ يمكنك القيام به هو إعطائهم إنطباع بأنهم الوحيدون الذى يمكنهم فهم التكنولوجيا الخاصة بك. والناس الذين يعملون على الماكينات لفترة طويلة يشعرون بأنهم يعرفون أكثر بكثير مما تفعله بجهاز جامع البيانات الحديث. إحترم تلك المشاعر واطلب نصيحتهم وبالتالى سوف تحصل على الكثير وأكثر من ذلك.

بالإضافة إلى ذلك، يجب عليك مناقشتهم مع شرح عملية التشخيص وليس من خلال البصمة وغيرها من البيانات المعقدة، ولكن بالوصف مع تقديم ما يدعم رأيك وإستنتاجاتك. وإذا أمكنك إقناعهم فإنهم يثقون فى إستنتاجاتك ويكونون أكثر تقبلاً.

ولكن لا تنتظر تثقيفهم فى تكنولوجيا مراقبة حالة المعدات، إنهم لا يحتاجون لكل ذلك ولكن يمكن تفهيمهم ببساطة تأثير القوى داخل الماكينة على شكل الإهتزازات وبالتالى سوف يشعرون بمزيد من الراحة مع ما وصلت إليه من تشخيص.

يجب أن تفهم أيضاً أن ليس كل التشخيصات الخاصة بك سوف تكون صحيحة. حتى الممارسين الأكثر خبرة تخطئ. شئ واحد هو الكشف عن طبيعة المشكلة ولكن تحديد شدة العطل بشكل صحيح هو التحدى. وإذا تم الإصلاح وكان رولمان البللى به أضرار طفيفة أو أن الضرر غير ظاهر على سبيل المثال، فإنك قد تجد ما يقف بجانبك.

ويجب عليك أن تتقبل المصاعب بروح طيبة وشرح المنطق الخاص بك. وتعلم من هذه التجربة. ومرة أخرى إذا شاركتهم فى صنع القرار فإنهم سيكونون أقل نقداً إذا كان التشخيص غير صحيح.

١٢- تحليل السبب الجذري للمشكلة انظر إلى القسم الخامس من الباب الخامس

١٣- التحقق من الإصلاح انظر إلى القسم الخامس من الباب الخامس

١٤- عوامل أخرى تؤدى إلى نجاح برنامج مراقبة حالة الماكينات الدوارة

هناك واجبات هامة لقسم مراقبة حالة المعدات وإدارة الصيانة ومديرالمصنع لنجاح برنامج مراقبة حالة الماكينات الدوارة وهذه الواجبات هى:-

١٤-١- واجبات قسم مراقبة حالة المعدات:-

١- تحديد الماكينات الحساسة والهامة فى المصانع وتجميع البيانات الفنية لها لتكوين قاعدة بيانات متكاملة وتخزينها على الحاسبات الآلية لأغراض القياس والتحليل والتشخيص.

٢- تحديد أماكن القياس على الماكينات المختارة بحيث تكون إشارات الإهتزازات الصادرة منها معبرة عن حالة المعدات أصدق تعبير ووضع مكعبات للقياس عليها أو وضع علامات بأقلام غير قابلة للمسح أو الإزالة.

٣- وضع القواعد التنفيذية لتطبيق نظام الصيانة التنبؤية على هيئة خطوات محددة وواضحة وملزمة للقائمين بأعمال القياس والتحليل والتشخيص.

٤- وضع خطة شهرية لقياس الإهتزازات على المعدات وعمل خطوط السير "Rootes" الخاصة ببرنامج القياس اليومى والأسبوعى والشهرى.

٥- تحديد القيم المسموح للإهتزازات لكل معدة وتحديث هذه القيم تبعاً لظروف وحالة كل ماكينة.

٦- وضع خطة لسير المعلومات الخاصة بنتائج القياس إلى أن تصل إلى القرار الخاص بإيقاف الماكينة وقبولها بعد الصيانة.

٧- تدريب الفنيين على عملية جمع القراءات بالأجهزة المحمولة وتفريغها فى برامج الحاسب بعد الإنتهاء من عملية القياس وتدوين جميع الملاحظات على المعدات أثناء عملية القياس (حرارة - ضغط - تفكك - حالة السيور - تسرب الزيوت - الضوضاء - حالة الأرضية).

٨- التدريب على إستخلاص البيانات من الحاسب الآلى بغرض التحليل والتشخيص وكتابة التقارير الفنية الخاصة بتحديد العيوب والتوصيات اللازمة لمعالجتها وإعداد نوعيات مختلفة من هذه التقارير ترسل إلى كل من إدارات الإنتاج والصيانة والإدارة العليا.

٩- إجادة عملية تحليل وتشخيص الأعطال ورسم منحنى الإطراد للمعدات الهامة للإكتشاف المبكر للأعطال والتدقيق فى بصمة الإهتزاز لتحديد طبيعة ومدى العيب بكل دقة لكسب ثقة المسئولين عن الصيانة.

١٠- عمل تقارير شهرية ورفعها إلى أعلى المستويات لإظهار نتائج الأعمال وإظهار مقدرة قسم مراقبة حالة المعدات على حل المشاكل وإكتشاف الأعطال مما يترتب على ذلك من تدعيم فنى ومعنى وإيمان الإدارة العليا بالدور الذى يقوم به.

١١- يجب أن تكون الدورة المستندية على أعلى مستوى وعليه يجب تصميم وطبع المستندات والنماذج اللازمة لتجميع البيانات الفنية وتجميع النتائج وكتابة التقارير بحيث تشتمل على كافة المعلومات التى تتيح القدرة على التشخيص الهندسى بكفاءة عالية.

١٢- الإستفادة من الأجهزة المستخدمة لجمع بيانات الإهتزازات والبرامج الملحقة معها بأقصى طاقة ممكنة ورفع كفاءة إستخدامها والتعرف على الخصائص الخفية بها والتطوير المستمر للأداء عن طريق إستخدام أحدث طرق القياس والإختبار والتحليل والتشخيص.

١٣- نظراً لأن ٧٠% من مشاكل الماكينات ينحصر بين عدم الإتزان الديناميكى وعدم محورية المعدات فإنه يفضل عند تطبيق الصيانة التنبؤية أن يتم تدعيمها بأجهزة ضبط محاور والمستخدم [illegible] ماكينات الإتزان الديناميكى.

١٤- التحديث الدائم للأجهزة والبرامج المستخدمة فى مجال الصيانة التنبؤية لزيادة فاعليته ومواكبة التطور الهائل.

١٥- تعاون قسم مراقبة حالة المعدات مع الصيانات وكسب ثقتهم على أساس أنهم شركاء لهم فى عمل واحد وهدف واحد وليسوا أداه لكشف عيوبهم وأخطائهم.

١٤-٢- واجبات إدارة الصيانة

١- تزويد الصيانات بأحدث تكنولوجيا الفك والتركيب للمحافظة على سلامة المعدات وتطوير الأداء.

٢- إلزام المورد بإرسال البيانات التفصيلية عن المعدات التى يتم توريدها بغرض الصيانة التنبؤية.

٣- الإلتزام بإيقاف الماكينة للإصلاح أو الصيانة فقط عندما تتعدى قيم الإهتزازات المقاسه القيم المسموحه للإهتزازات ومعرفة نتائج تحليل وتشخيص الإهتزازات ولتحديد طبيعة ومدى العيب الذى حدث فى الماكينات وبخلاف ذلك لا يصح إيقاف الماكينة لفكها أو صيانتها إذا كانت قراءات الإهتزازات عليها فى الحدود المسموح بها .

٤- يجب إستدعاء قسم مراقبة حالة المعدات بعد إجراء أعمال الصيانة (سواء شاملة أو بتغيير جزء أو أجزاء من الماكينة) لقياس الإهتزازات وللتأكد من وصول قيمة الإهتزازات على الماكينة إلى الحدود المسموح بها والتوصية بقبول الماكينة للعمل بعد أعمال الصيانة.

٥- زيادة التعاون مع قسم مراقبة حالة المعدات وإعتبارهم جزء منهم وتسهيل مهمتهم فى أداء عملهم ومدهم بالمعلومات الكافية عن أى تغيير فى بيانات المعدات لإمكانية تحديث قاعدة البيانات وإتباع التوصيات وتنفيذها بكل دقة.

١٤-٣- واجبات مدير المصنع

١- يجب أن تكون تبعية العاملين القائمين بالصيانة التنبؤية لرئاسة مدير المصنع.

٢- تنمية الوعى داخل المصانع بدور قسم مراقبة حالة المعدات وفى سبيل ذلك يجب تنفيذ سلسلة من المحاضرات لتوعية العاملين والتأكيد على دوره وأهميته فى الأعمال الفنية داخل المصانع.

٣- وضع تصور للتعاون بين قسم مراقبة حالة المعدات والصيانة والإنتاج وكيفية سريان المعلومات بينهم.

٤- تطبيق هذه الأنواع من التكنولوجيا المتطورة يحتم إستمرار التدريب لرفع كفاءة إستخدام الأجهزة وتطوير الأداء وفى هذا الصدد يجب إعداد برنامج تدريبى متكامل لإستمرار تدريب المهندسين والفنيين على أحدث تكنولوجيا الصيانة التنبؤية.

٥- ضرورة أن يكون جميع العاملين فى مجال الصيانة التنبؤية مؤهلين بشهادات فى مجال عملهم وحسب مستوى مسئولياتهم، وهذا التأهيل يتيح للسادة المسئولين أن تطمئن على المستوى الفنى للقائمين بهذه الأعمال حتى يمكنهم أداء الواجبات المطلوبة منهم على أحسن وجه بما يتفق مع متطلبات المصانع.

٦- وضع نظام حساب التكاليف لإحتساب العائد من تطبيق نظام الصيانة التنبؤية ولبيان الوفر الناتج من الأعمال التى يقومون بها وهذا لن يتحقق إلا بالتعاون الصادق بين قسم مراقبة حالة المعدات والصيانات والإنتاج وإدارة التكاليف.

- النهاية -

رقم الإيداع بالدار المصرية للكتاب

2017 / 23479

مطابع دار الوثائق

شبين الكوم البر الشرقي شارع مكي
من شارع محمود شاهين ٠١٠٠١٢٢١٣١٨

إهتزازات الماكينات

أساسيات وقياسات وتحليل

محتوي الكتاب :

الباب الأول : الإهتزازات ومراقبة حالة الماكينات

الباب الثاني : إستجابة النظام الميكانيكي

الباب الثالث : أساسيات الإهتزازات

الباب الرابع : قياس الإهتزازات

الباب الخامس : تحليل الإهتزازات

الباب السادس : تشخيص أعطال الماكينات

الباب السابع : تشغيل برنامج ناجح لمراقبة حالة المكينات الدوارة



مهندس / عاطف سلام بكر زهران